

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
MARIA CAROLINE DE PAULA MOURA

QUALIDADE DE ENERGIA DURANTE PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS: análise de distorções harmônicas

Varginha
2018

MARIA CAROLINE DE PAULA MOURA

**QUALIDADE DE ENERGIA DURANTE PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS: análise de distorções harmônicas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Professor Me. Eduardo Henrique Ferroni e coorientação do Professor Esp. Roberto Lazarino do Prado Mudesto.

**Varginha
2018**

MARIA CAROLINE DE PAULA MOURA

**QUALIDADE DE ENERGIA DURANTE PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS: análise de distorções harmônicas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: / /

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

Prof. Esp. Roberto Lazarino do Prado Mudesto

Prof. Esp. Silvio Bottrel Guimarães

OBS:

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me proporcionado saúde e força para superar todas as dificuldades durante todo esse tempo de graduação. A minha mãe Elisa, por ser minha motivação e chave para o alcance dos meus objetivos, por me apoiar todos os dias e dedicar seu tempo para que eu conseguisse me formar. Ao meu namorado Bryan por todo seu apoio, paciência, ajuda, por ter me levantado e ter sido minha luz quando tudo não parecia fazer sentido. Sou grata pela dedicação, paciência, pelos conhecimentos e ajuda que recebi de meus orientadores Eduardo Henrique Ferroni e Roberto L. do Prado Mudesto. E agradeço aos meus amigos de classe que sempre presentes me proporcionaram os melhores dias em cinco anos.

“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada”.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho analisa a qualidade de energia durante partidas de motores de indução trifásicos, destacando as distorções harmônicas. Há uma grande importância de obter-se a correção dos distúrbios quando o problema é analisado no sentido financeiro de uma empresa, ou seja, quanto mais rápido os distúrbios forem eliminados nos equipamentos mais economia as indústrias possuirão. Os estudos se iniciam no laboratório de máquinas do Centro Universitário do Sul de Minas, abordando então um motor trifásico de indução de 6 cv para as análises a serem feitas. O objetivo deste estudo é realizar análises da qualidade da energia elétrica na máquina trifásica, acionando-a com três métodos diferentes de partida. Assim, o estudo será focado na qualidade de energia após o método que aciona o motor trifásico, analisando distorções harmônicas e quais distúrbios são causados na máquina. Essa tarefa será alcançada por meio da utilização do equipamento de qualidade de energia FLUKE modelo 435 em ensaios laboratoriais e mediante a revisões bibliográficas. Nos ensaios os três métodos de partida utilizados são: chave estrela-triângulo, inversor de frequência e *soft-starter*. O objetivo desses métodos é a redução da corrente de partida e a análise da 3ª e 5ª harmônica que cada partida apresenta em suas três fases, obtendo também a distorção total no momento do acionamento. Por fim, logo após obter os dados e mediante às análises feitas, a pesquisa apresenta como resultado final o método de partida mais viável a ser utilizado na máquina escolhida.

Palavras-chave: Harmônicos. Qualidade de Energia. Distorções. Motores de Indução. Distúrbios.

ABSTRACT

This work analyzes the power quality during three-phase induction motors starters, highlighting harmonic distortions. It is of great importance to obtain the correction of disturbances when the problem is analyzed in the financial sense of a company, that is, the faster the disturbances are eliminated in the equipment, the more savings the industries will have. The studies begin in the laboratory of machines of the University Center of the South of Minas, approaching then a three-phase motor of induction of 6 hp for the analyzes to be done. The objective of this study is to carry out analyzes of the quality of electric power in the three-phase machine, triggering it with three different starting methods. Thus, the study will focus on the quality of energy after the method that drives the three-phase motor, analyzing harmonic distortions and which disturbances are caused in the machine. This task will be achieved through the use of FLUKE model 435 power quality equipment in laboratory tests and through literature reviews. In the tests the three starting methods used are: star-delta key, frequency inverter and soft-starter. The purpose of these methods is the reduction of the starting current and the analysis of the 3rd and 5th harmonic that each game presents in its three phases, also obtaining the total distortion at the moment of the activation. Finally, after obtaining the data and through the analyzes made, the research presents as final result the most feasible starting method to be used in the chosen machine.

Keywords: *Harmonics. Power Quality. Distortions. Induction Motors. Disorders.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Construção do motor de indução trifásico	10
Figura 02 – Característica torque/corrente em função da velocidade	13
Figura 03 – Comparativo entre os métodos de partida.....	18
Figura 04 – Ocorrência de um transitório em uma senoide.....	20
Figura 05 – Corrente típica de um transitório impulsivo	25
Figura 06 – Transitório oriundo de chaveamento de um banco de capacitores	25
Figura 07 – Triângulo de potências	26
Figura 08 – Representação da decomposição de um sinal distorcido	31
Figura 09(a) – Presença de terceira e quinta harmônica no sinal fundamental	34
Figura 09(b) – Deformação da senoide fundamental	35
Figura 10 – Deformação de um sinal fundamental pela presença de várias senoides de ordens superiores	36
Figura 11 – Onda fundamental com sua harmônica $n = 5$	36
Figura 12 – Onda resultante da soma da onda da tensão e da harmônica $n = 5$	37
Figura 13 – Potências em um sistema com harmônicas	49
Figura 14 – Funcionamento do filtro ativo.....	51
Figura 15 – Esquema do filtro ativo	51
Figura 16 – Filtro passivo.....	53
Figura 17 – Filtro híbrido	53
Figura 18 – Diagrama de blocos referente a experimentos	54
Figura 19 – Diagrama de ligação do método de partida com inversor de frequência.....	56
Figura 20 – Resumo da medição com partida utilizando inversor de frequência.....	56
Figura 21 – Distorções harmônicas de tensão com inversor de frequência.....	57
Figura 22 – Influência das harmônicas coletadas na partida com inversor de frequência ..	58
Figura 23 – Diagrama de ligação do método de partida com chave estrela-triângulo	60
Figura 24 – Distorções harmônicas de tensão com chave estrela-triângulo.....	61
Figura 25 – Distorções harmônicas de corrente com chave estrela-triângulo.....	61
Figura 26 – Impacto das distorções harmônicas individuais nas senoides das fases	62
Figura 27 – Diagrama de ligação do método de partida com <i>Soft-Starter</i>	63
Figura 28 – Distorções harmônicas de tensão com <i>Soft-Starter</i>	64
Figura 29 – Distorções harmônicas de corrente com <i>Soft-Starter</i>	64
Figura 30 – Impacto das distorções harmônicas individuais nas senoides das fases	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Classificação das variações de Tensão de Curta Duração	29
Quadro 02 – Terminologias aplicáveis aos cálculos das distorções harmônicas	38
Quadro 03 – Limites das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	40
Quadro 04 – Ordem, frequência e sequência de harmônicas	42
Quadro 05 - Parâmetros elétricos do motor utilizado.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Limites para os desequilíbrios de tensão	32
Tabela 02 – TDH e harmônicas individuais na partida com Inversor de Frequência	57
Tabela 03 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em percentagem da tensão fundamental)	58
Tabela 04 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)	59
Tabela 05 – TDH e harmônicas individuais na partida estrela-triângulo	62
Tabela 06 – TDH e harmônicas individuais na partida com <i>Soft-Starter</i>	65
Tabela 07 – Custo estimado para adoção dos métodos de partida	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	15
2.1 Obtenção do conjugado em um motor de indução	16
2.2 Torque do motor de indução	17
2.3 Escorregamento do rotor	17
2.4 Frequência do rotor	18
2.5 Corrente de partida	19
2.5.1 Partida estrela-triângulo.....	20
2.5.2 Partida com <i>Soft-Starter</i>	21
2.5.3 Partida com inversor de frequência	21
2.5.4 Diferença entre os métodos de partida	22
3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	24
3.1 Distúrbios relacionados a qualidade de energia	26
3.1.1 Transitórios ou transientes.....	26
3.1.1.1 Transitório impulsivo	27
3.1.1.2 Transitório oscilatório	28
3.1.2 Variação de tensão.....	28
3.1.2.1 Variação de tensão de curta duração	29
3.1.2.2 Variação de tensão de longa duração	30
3.1.3 Surto de tensão ou <i>Spike</i>	30
3.1.4 Variação de frequência	30
3.1.5 Desequilíbrio de tensão	31
3.1.6 Ruído	32
3.1.7 Redução do fator de potência	32
4 HARMÔNICA	35
4.1 Parâmetros e cálculos de harmônicas	38
4.2 Princípios técnicos das harmônicas	41
4.3 Classificação das harmônicas	42
4.4 Equipamentos geradores de harmônicas	43
4.4.1 Cargas geradoras de harmônicas	43
4.5 Perturbações causadas por harmônicas	44
4.5.1 Impacto econômico das perturbações.....	44
4.6 Harmônicas em máquinas elétricas	45
4.6.1 Análise harmônica no motor de indução trifásico	45
4.6.1.1 Efeitos sobre os motores de indução assíncrono	45
5 FATOR DE POTÊNCIA E HARMÔNICAS	47
5.1 Interpretação do valor do fator de potência na presença de harmônicas	47
5.2 Potência de distorção	48
6 FILTROS	50
6.1 Filtros ativos	50
6.2 Filtros passivos	52
6.3 Filtros híbridos	53

7 METODOLOGIA	54
7.1 Especificações dos estudos laboratoriais	54
7.2 Resultados das análises laboratoriais	55
7.2.1 Partida com inversor de frequência	55
7.2.2 Partida com chave estrela-triângulo	60
7.2.3 Partida com <i>Soft-Starter</i>	63
7.3 Viabilidade de custo	66
8 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O extenso uso de motores elétricos trifásicos deve-se ao fato de grande parte da energia elétrica produzida industrialmente ser gerada em corrente alternada (CA).

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados, especialmente em indústrias. Um dos princípios que avigora para a redução de seu rendimento é a existência de distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) em sua tensão de alimentação, os quais podemos citar o desequilíbrio e a distorção harmônica de tensão. Existem muitos estudos que avaliam os impactos desses eventos aplicados particularmente no motor de indução trifásico.

Um motor elétrico é uma máquina designada a transformar energia elétrica em energia mecânica. Dessa forma ao acionarmos um motor à rede elétrica, ele absorverá uma certa quantidade de energia elétrica e, em retribuição, haverá o acionamento de uma carga (SILVA, 2017). Já um motor de indução pode-se dizer um motor elétrico arquitetado com dois campos magnéticos girantes.

Segundo Neves (2014), do total da energia fornecida pelas concessionárias, cerca de 44% é consumida no setor industrial. Neste setor, mais de 2/3 da demanda está relacionada aos motores. Diante destes fatos, a necessidade de pesquisas avaliando o comportamento dos motores no que tange o rendimento e o conjugado dessas máquinas mostra-se importante. Um dos fatores que colabora para a redução dessas grandezas é a presença de distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) na tensão de alimentação dos motores.

Os estudos realizados à qualidade de energia elétrica têm se transformado um assunto de grande relevância para as concessionárias, pesquisadores, órgãos reguladores e, principalmente dos consumidores. Todos estes procuram a normatização, a identificação, qualificação e a redução das causas dos distúrbios. Vale ressaltar que a tensão estabelecida pela concessionária possui distúrbios de qualidade que a afasta do padrão correto para um sistema. Dentre os distúrbios podemos destacar as distorções harmônicas, a variação do fator de potência, variações de tensão de curta e longa duração, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão e as variações de frequência. De acordo com Neves (2014), estes fenômenos podem causar alterações no comportamento dos equipamentos ligados à rede, podendo acarretar efeitos mínimos ou significativos. Por estes motivos, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou um manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional que conceitua e fornece alguns limites para tais fenômenos (ANEEL, 2014).

O presente trabalho apresenta pesquisas bibliográficas que abordam o efeito destes distúrbios aplicados principalmente no desempenho do Motor de Indução Trifásico. Diante

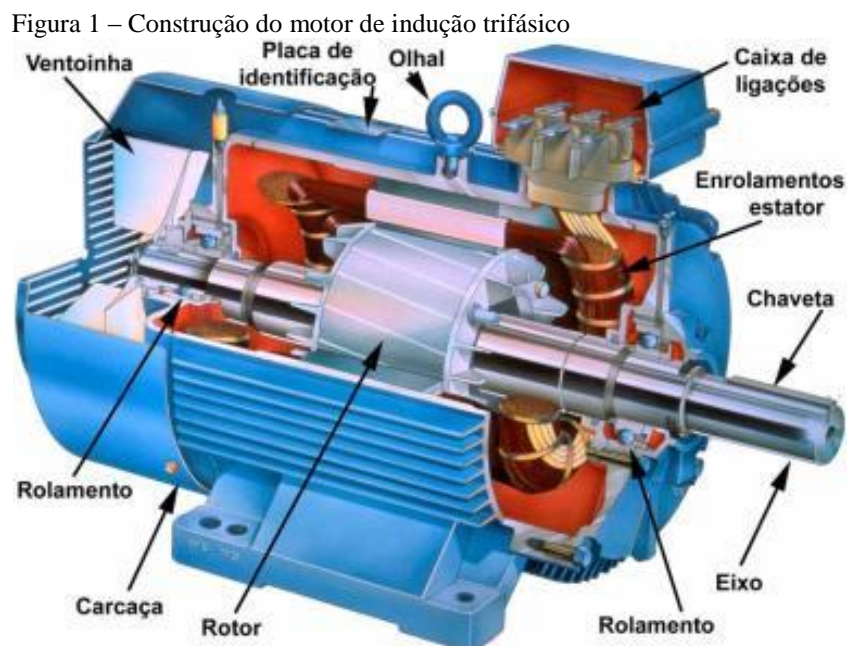
disso, é de grande relevância estudos que apresentem o rendimento e o conjugado do motor de indução trifásico, podendo ser necessários quando este é composto por tensões com distúrbios de qualidade aplicados ao mesmo tempo.

O trabalho apresenta inicialmente o funcionamento básico e construção de um motor de indução trifásico. Logo, a pesquisa traz estudos aprofundados da qualidade de energia, bem como uma breve síntese de alguns distúrbios como transitórios, desequilíbrio de tensão, afundamento de tensão. Em seguida a pesquisa aprofunda no estudo sobre harmônicas.

O objetivo deste trabalho se inicia com estudos laboratoriais acionando um motor de indução trifásico à rede elétrica e realizando análises no momento da partida e em regime permanente, por meio de três métodos de partida. Portanto, o presente trabalho expressa o problema causado, e apresenta como resultado o melhor método de partida a ser utilizado, neste caso, ao partir o MIT (motor de indução trifásico), com a finalidade de corrigir ou diminuir os impactos causados por distorções harmônicas no motor de indução.

2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

O motor de indução trifásico opera pelo princípio da indução eletromagnética, baseado no campo magnético girante, produzido por três bobinas defasadas geometricamente de 120° , que são alimentadas por tensões trifásicas balanceadas de frequências F , também defasadas no tempo de 120° elétricos. O motor de indução possui dois circuitos elétricos distintos, são chamados de estator e rotor, e um circuito magnético, com a capacidade de ser dividido em algumas partes, conforme a Figura 1. O estator e o rotor são de grande importância, pois o estator, conhecido como a parte fixa, recebe alimentação da rede elétrica alternada trifásica, enquanto o rotor, conhecido como a parte móvel, pode ser definido por dois tipos que são o bobinado ou gaiola de esquilo. Uma das grandes vantagens do motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo é a sua competência de operar sem que o mesmo entre em contato com os enrolamentos do rotor. Devido a isso, há uma grande redução dos custos e manutenções (KOSOW, 2005).



Fonte: (SANTOS, 2011, p. 4).

Para Oliveira (2013), o funcionamento do motor de indução trifásico é a alimentação do enrolamento de armadura do motor por um conjunto de tensões trifásicas AC que culminam na circulação de correntes AC nas bobinas, cujos eixos magnéticos são defasados de 120° entre si.

Cada corrente em cada bobina gera, então, o seu campo magnético variante no tempo segundo o seu próprio eixo magnético; a composição vetorial dos três campos

magnéticos assim obtidos, gera um campo magnético resultante que gira no entreferro a uma velocidade $\omega_e = 2\pi fe$ (em rad/s elétricos), onde fe é a frequência de excitação do sistema de alimentação. O campo magnético girante criado no entreferro induz tensões nos enrolamentos do rotor. Essas tensões induzidas geram, por sua vez, correntes que circulam nas bobinas do rotor, criando um campo magnético resultante que tende a se opor ao primeiro, originando, desta forma, o conjugado eletromagnético. (OLIVEIRA, 2013, p. 8).

Após conhecermos o funcionamento básico de um MIT, torna-se importante o estudo sobre alguns outros aspectos de seu funcionamento.

2.1 Obtenção do conjugado em um motor de Indução

Um conjunto trifásico de tensões é aplicado ao estator resultando em um conjunto trifásico de correntes circulando no estator. Essas correntes produzem um campo magnético que gira em sentido anti-horário (CHAPMAN, 2013). A velocidade de rotação desse campo magnético é calculada pela Equação 1.

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (1)$$

Onde,

n_{sinc} = velocidade síncrona (rpm)

f = frequência do sistema no estator (Hz)

P = número de polos da máquina

O campo magnético girante percorre pelas barras do rotor e induz uma tensão nelas. Essa tensão induzida em uma determinada barra é dada pela Equação 2.

$$e_{\text{ind}} = (v \times B) \cdot l \quad (2)$$

Onde,

e_{ind} = tensão induzida (V)

v = velocidade da barra em relação ao campo magnético

B = vetor densidade de fluxo magnético

l = comprimento do condutor dentro do campo magnético

O movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético do estator que gera tensão induzida na barra do rotor. Segundo Chapman (2013), a velocidade das barras superiores do rotor em relação ao campo magnético é para a direita, desse modo, a tensão induzida nas barras superiores é para fora da página, ao passo que a tensão induzida nas barras inferiores é

para dentro da página. Isso resulta em um fluxo de corrente para fora das barras superiores e para dentro das barras inferiores. Entretanto, como a estrutura do rotor é indutiva, a corrente de pico do rotor está atrasada em relação à tensão de pico do rotor. O fluxo de corrente do rotor produz um campo magnético de rotor B_R .

Por fim, o conjugado resultante é anti-horário. Devido a isso, o rotor acelera nesse sentido. Contudo, há um certo limite para a velocidade do motor. Ou seja, se o rotor do motor de indução estiver girando na velocidade síncrona, as barras do rotor estarão estacionárias em relação ao campo magnético e não haverá tensão induzida. De acordo com Chapman (2013), se e_{ind} for igual a 0, então não haverá corrente nem campo magnético no rotor. Sem campo magnético no rotor, o conjugado induzido será zero e o rotor perderá velocidade como resultado das perdas por atrito. Portanto, um motor de indução pode ganhar velocidade até próximo da velocidade síncrona, sem nunca a alcançar exatamente.

2.2 Torque do motor de indução

O torque em um motor de indução depende, principalmente, da intensidade da interação entre os campos do rotor e do estator, representados pela corrente do rotor e a tensão do estator.

O conjugado do motor (também chamado de toque), é a medida do esforço necessário para girar o eixo. Pode ser calculado também pela Equação 3.

$$T = \frac{P}{n_r} \quad (3)$$

Onde,

T = torque (N.m.);

P = potência desenvolvida (W);

n = velocidade nominal do rotor (rad/s).

2.3 Escorregamento do rotor

A tensão induzida nas barras do rotor de uma máquina de indução é dependente da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Como o desempenho de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, regularmente tem mais lógica falar em velocidade relativa. São usados dois termos para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos. Um desses termos é a velocidade de escorregamento, determinada como

sendo a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor. A velocidade de escorregamento pode ser calculada pela Equação 4.

$$n_{\text{esc}} = n_{\text{sinc}} - n_r \quad (4)$$

Onde,

n_{esc} = velocidade de escorregamento da máquina

n_{sinc} = velocidade dos campos magnéticos

n_r = velocidade mecânica do eixo do motor

Assim, o outro termo utilizado para descrever o movimento relativo é o escorregamento, que é definido pela velocidade relativa expressada em uma base por unidade ou porcentagem. De outro modo, o escorregamento é definido pela Equação 5.

$$s = \frac{n_{\text{sinc}} - n_r}{n_{\text{sinc}}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde,

s = escorregamento

n_{sinc} = velocidade dos campos magnéticos

n_r = velocidade mecânica do eixo do motor

Note que, se o rotor estiver girando na velocidade síncrona, então $s = 0$, ao passo que, se o rotor estiver estacionário, então $s = 1$. Todas as velocidades normais de um motor recaem em algum lugar entre esses dois limites. É possível expressar a velocidade mecânica do eixo do rotor em termos de velocidade síncrona e de escorregamento. A velocidade mecânica pode ser definida pela Equação 6.

$$n_r = (1 - s) \times n_{\text{sinc}} \quad (6)$$

Onde,

n_{sinc} = velocidade dos campos magnéticos

n_r = velocidade mecânica do eixo do motor

s = escorregamento

2.4 Frequência do rotor

Um motor de indução trabalha induzindo tensões e correntes no rotor da máquina e, por essa razão, ele também foi denominado algumas vezes transformador rotativo. Como tal, o

primário (estator) induz uma tensão no secundário (rotor). Entretanto, diferentemente de um transformador, a frequência do secundário não é necessariamente a mesma que a frequência do primário (CHAPMAN, 2013).

Para $n_m = 0$ rpm, a frequência do rotor é $f_{re} = f_{se}$ e o escorregamento é $s = 1$. Para $n_m = n_{sinc}$, a frequência do rotor é $f_{re} = 0$ Hz e o escorregamento é $s = 0$. Para qualquer velocidade intermediária, a frequência do rotor é diretamente proporcional à diferença entre a velocidade do campo magnético n_{sinc} e a velocidade do rotor n_m . Uma vez que o escorregamento do rotor é definido pela Equação 4, a frequência do rotor pode ser calculada pela Equação 7.

$$f_{re} = s \times f_{se} \quad (7)$$

Onde,

f_{re} = frequência do rotor (Hz)

f_{se} = frequência do estator (ou da tensão de alimentação) (Hz)

s = escorregamento percentual

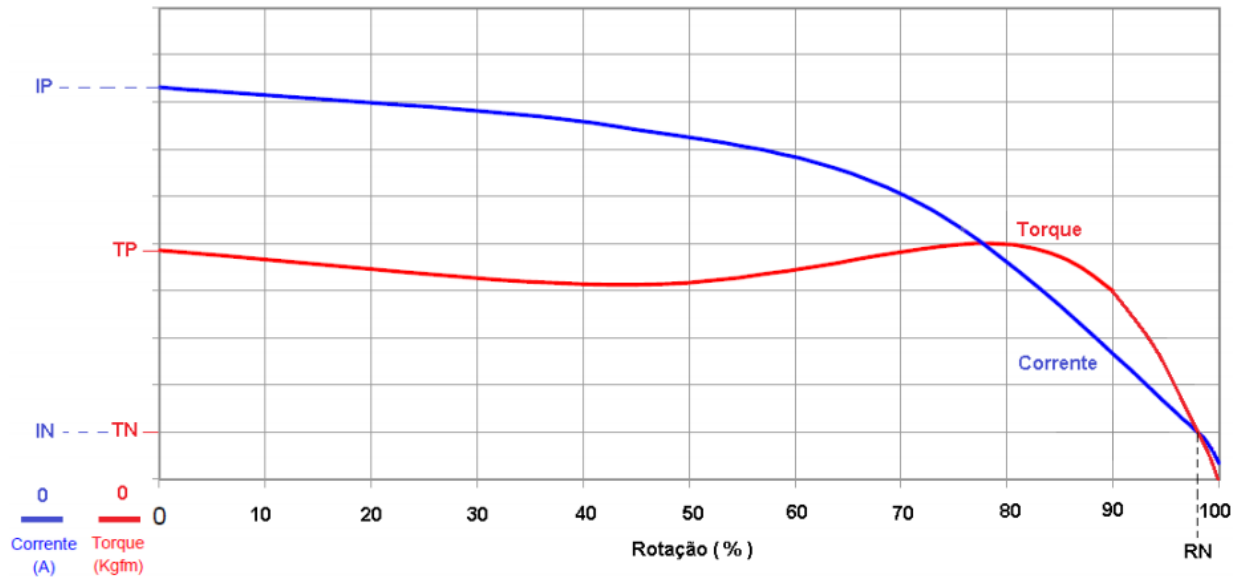
2.5 Corrente de partida

É comum motores com corrente de partida igual a 7 ou 8 vezes a corrente nominal. Mas, para os motores de produção, geralmente encontrados no mercado, a corrente de partida encontra-se entre 5 e 7 vezes a corrente nominal. ($5,5 \times I_N < I_P < 7,00 \times I_N$). São denominados 3 métodos de partida mais utilizados no acionamento de motores elétricos de indução, que são partida com inversor, partida com chave estrela triângulo e partida com *soft-starter*.

Um dos momentos críticos é a partida de motores elétricos. Os motores solicitam muito mais corrente no momento da partida do que em regime contínuo, isto é chamado de pico de corrente de partida. O valor da corrente de partida ou de rotor bloqueado é dado de placa IP/IN , um valor comum de IP/IN é 8, isso significa que a corrente de partida para um motor de $IP/IN = 8$ é de 8 vezes a corrente nominal e dependendo da carga esse valor de corrente pode permanecer por um tempo longo o suficiente para disparar dispositivos de proteção dos circuitos de comando (NASCIMENTO, 2015).

Outro fator que deve ser considerado é o número de partidas que se pode realizar num motor dentro do período de uma hora, essa quantidade depende da carga, pois o tipo de carga influencia diretamente o tempo de aceleração do motor entre rotor bloqueado e a rotação nominal. A Figura 2 representa o comportamento da corrente e do torque em função da rotação.

Figura 2 – Característica torque/corrente em função da velocidade



Fonte: (NASCIMENTO, 2015, p. 3).

2.5.1 Partida estrela-triângulo

As concessionárias de energia elétrica não permitem partidas diretas para motores de potência acima de 5 cv ou 3,7 kW, para entradas de energia fornecidas em baixa tensão até 75 kW ou 100 cv. Os fabricantes dos motores fornecem os motores com acesso aos terminais dos enrolamentos para que se possa fazer suas ligações na configuração estrela ou na configuração triângulo, e, se fizermos as comutações das configurações das ligações dos motores por meio de comandos automáticos, podemos melhorar a condição de partida do motor aos olhos da rede elétrica (NASCIMENTO, 2015). A partida estrela-triângulo quer dizer que devido a comandos elétricos de partida, realizamos a ligação das bobinas em estrela e em seguida, depois de um certo tempo, a ligação das bobinas modifica para triângulo automaticamente. Ao fazer esse procedimento, diminui-se a corrente de partida sem prejudicar a rede elétrica.

Resumidamente, a partida estrela triângulo trata-se de uma forma de energizar um motor trifásico com tensão menor para que ele saia da inércia (ligação do motor em estrela), portanto a corrente exigida para esse deslocamento não será tão grande quanto a corrente exigida para a partida direta. Assim que o motor atinge uma determinada velocidade, o circuito é alimentado com a tensão de funcionamento (ligação triângulo) e este passa a atingir o regime de funcionamento. A mudança pode ser de forma manual ou automática por meio de comandos eletrônicos. (MARTINHO, 2012, p. 46).

A corrente de partida em estrela é $1/3$ da corrente de partida em triângulo. No momento da comutação os valores de corrente e de torque retomam os valores que deveriam estar se a partida fosse em triângulo, exatamente na rotação da comutação (NASCIMENTO, 2015).

2.5.2 Partida com *Soft-Starter*

Soft-Starters são equipamentos eletrônicos compostos por pontes de SCR's (tiristores) ativadas por meio de um circuito eletrônico, que possui o intuito de controlar a tensão de partida do motor, assim como seu desligamento.

Ainda seguindo a linha de necessidade da redução de corrente de partida através da redução de tensão de alimentação, os *soft-starters*, como são conhecidos os equipamentos modernos que permitem uma partida suave, são baseados em tiristores (SCR) que ligados na configuração antiparalela são acionados por um circuito eletrônico de disparo, de forma a controlar a corrente de partida pelo controle da tensão. O controle é feito pela variação do seu ângulo de disparo. Os circuitos de *soft-starter* normalmente trabalham com sistemas *by-pass* que, assim como as demais formas de partida apresentadas, acionam a tensão da rede, após atingir a velocidade desejada. Essa prática permite que os tiristores sejam preservados quanto a sobreaquecimentos. Vale a lembrança de que o controle do ângulo de disparo dos tiristores causa uma distorção na forma de onda, o que pode ocasionar problemas de harmônicas, assunto que será tratado mais à frente. (MARTINHO, 2012, p. 48).

A partida com *soft-starter* suaviza a energização e desligamento do motor. Então, *soft-starters* possuem o poder de substituição dos clássicos métodos de ligação por chave compensadora, estrela-triângulo e partida direta.

2.5.3 Partida com inversor de frequência

Os inversores de frequência foram criados não somente para partir os motores de gaiola, mas também para controlar a velocidade e o torque do motor. Os inversores entregam ao motor as 3 fases da rede com frequências e tensões variáveis, de acordo com a necessidade do processo ou com a necessidade do programador. Os inversores modernos, variam a frequência e calculam a tensão de forma a manter a corrente no motor constante e igual a corrente nominal do motor (NASCIMENTO, 2015).

Em inversores de frequência, analisando de outra forma, a rede é retificada, filtrada e aplicada a uma ponte de IGBT's (transistores polares de porta isolada). Os mesmos possuem o chaveamento com frequência de até 16kHz. A entrada dos inversores de frequência possui uma

frequência que não muda e com tensão alternada, mas a saída do mesmo possui a frequência que pode ser ajustável.

Vale ressaltar que inversores de frequência controlam não só a partida do motor, mas também variam a sua velocidade de maneira que o torque seja constante. São capazes de controlar frequências máximas e mínimas, controlam a corrente elétrica do motor, além de trabalharem como proteção de sobrecargas.

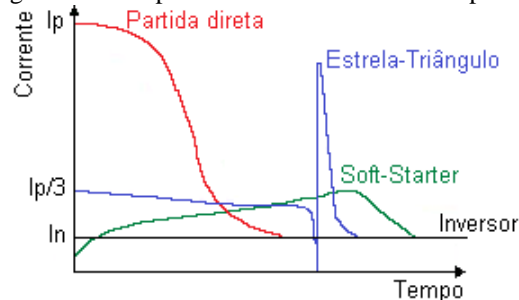
2.5.4 Diferença entre os métodos de partida

O que define qual método de partida será utilizado é simplesmente o modelo da função que o circuito necessita e, o que o modo de partida oferece (NASCIMENTO, 2015).

Quando se tem um objetivo de simplesmente acionar o motor, conclui-se que o *soft-starter* é a melhor escolha ao definir o método de partida. Mas, quando o objetivo ultrapassa a partida, é aconselhado a utilização do inversor de frequência, como por exemplo, para controle do eixo de um motor ou automatização de um processo no motor.

A Figura 3 representa um comparativo dos métodos de partida mencionados anteriormente. Lembrando que os experimentos que serão realizados não utilizarão a partida direta, pois o objetivo pelo qual estamos estudando os métodos de partida é a suavização da corrente de partida.

Figura 3 – Comparativo entre os métodos de partida.



Fonte: (NASCIMENTO, 2015, p. 7).

A Figura 3 nos apresenta 4 métodos de partida de um motor, e nos permite enxergar a diferença entre essas partidas analisando a corrente de partida. Como mencionado, queremos a suavização da corrente de partida, e para isso é essencial adotar um outro método que reduza essa corrente. Nas curvas de corrente mostradas na Figura 3, é possível visualizar que em partidas diretas a corrente possui um valor elevado. Para que esse valor de corrente diminua no momento da partida de um motor, utilizamos métodos de ligação como estrela-triângulo,

partidas com *soft-starters* e partidas com Inversores de frequência. Ao solucionar o problema da corrente elevada na partida, verifica-se que, de acordo com a Figura 3, a melhor maneira de suavizar a corrente de partida de imediato é adotar inversores de frequência, pois a corrente inicial no momento da partida do motor permanece constante. Mas, isso não significa que adotar *soft-starters* e partidas estrela-triângulo seja um erro, a diferença é que a corrente permanecerá constante depois de um certo tempo. Do mesmo modo que o valor da corrente de partida é pequena utilizando um inversor de frequência, ao adotar *soft-starter* e o método estrela-triângulo a corrente de partida também serão inferiores comparando à corrente na partida direta.

Por fim, saber quando utilizar estes tipos de partidas é de extrema importância, pois evitará que possíveis danos atinjam a qualidade de energia do circuito. Ou seja, escolher corretamente um método de partida de um motor está propriamente relacionada à qualidade de energia da rede elétrica de empresas, uma vez que tais dispositivos podem gerar harmônicas ou outros tipos de fenômenos que causem danos na forma de onda da tensão e/ou corrente elétrica da rede.

3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A preocupação com a qualidade da energia elétrica tornou-se importante para fornecedores e consumidores a partir do fim dos anos 80 devido ao aumento do nível de harmônicos gerados por cargas eletrônicas e também à utilização crescente de sistemas de controle microprocessados, resultando em cargas sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade da energia. De certa forma, a utilização de novas tecnologias obrigou consumidores e fornecedores a buscarem uma energia de qualidade, ou seja, sem desvios na tensão, corrente ou frequência que resultem na falha ou má operação dos equipamentos dos consumidores (RIBEIRO, 2007).

O Termo “O conceito de Qualidade de Energia” está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária (REZENDE, 2007, p. 3).

O termo Qualidade de Energia pode ser usado para conceituar os limites de variação das correntes e tensões de um sistema elétrico. Grande parte dos distúrbios surgem em equipamentos considerados como não lineares. Os efeitos gerados pela má qualidade de energia nos equipamentos elétricos são inconstantes, partindo de breves aquecimentos até falhas totais. Qualquer equipamento sensível a distúrbios, especialmente os eletrônicos, remete em seu desempenho referente às quantidades e intensidades das alterações das grandezas elétricas, antes que haja falhas.

De acordo com Annuniação (2011), no Brasil a preocupação com a qualidade da energia elétrica vem crescendo cada vez mais, haja vista o empenho de órgãos reguladores como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), concessionárias e consumidores. A má qualidade de energia pode se manifestar na tensão, frequência ou corrente, ocasionando em falhas ou má operação de equipamentos industriais, comerciais ou residenciais.

Fenômenos relacionados com variações do valor RMS (*Root Mean Square*) da tensão, os denominados afundamentos de tensão, causa mais frequente são os curtos circuitos, se constituem como um dos principais problemas a serem avaliados e tratados pelos profissionais do setor, pois, comprovadamente, são os maiores causadores de paradas de equipamentos e

processos, com custos financeiros que podem até mesmo comprometer a saúde financeira de uma determinada empresa.

Existem diferentes tipos de distúrbios que influencia na qualidade de energia elétrica. Os distúrbios que destacam são os transitórios impulsivos e oscilatórios, interrupções, variações na tensão de curta e longa duração, desequilíbrios de tensão, harmônicos, entre outros. Estes distúrbios são acarretados devido às descargas atmosféricas, operações no sistema, cargas não lineares e desequilibradas, partidas de motores, variações de cargas entre outros. A solução ou diminuição dos impactos causados pelos distúrbios surge através de proteções contra sobretensão, uso de filtros, entre outros. Segundo Ribeiro (2007, p. 1), para escolha da melhor opção se faz necessário um estudo econômico envolvendo custo e benefício, pois a qualidade da energia, depois da segurança pessoal, tem como objetivo principal uma energia de baixo custo.

A qualidade da energia não considera apenas a variação de tensão em torno do valor nominal, mas também, o número e os tipos de distúrbios que podem afetar os serviços, tais como: variação de frequência, quedas de tensão temporárias, pequenas interrupções de energia, entre outras. Dentro deste contexto, uma das mais importantes fontes de distúrbios que afetam a qualidade da energia são as distorções harmônicas (RIBEIRO, 2007, p. 2).

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (2018), os responsáveis pelo âmbito que rege as legislações e normas referentes à qualidade de energia elétrica é a PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Nela, consta no módulo 8, estabelecimentos e procedimentos que devem ser considerados de grande importância por abordar a qualidade do produto e do serviço prestado.

No 1.2 da PRODIST, para a qualidade do produto, o módulo 8 define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição. (PRODIST, 2018, p. 4).

Assim, a PRODIST tem o objetivo de tratar fenômenos de qualidade do produto em regime permanente ou transitório. (ANEEL, 2018). Em regime permanente são tratados pela PRODIST fenômenos como tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de tensão. Já em regime transitório a norma regulamentadora trata os fenômenos relacionados a variação de tensão de curta duração (ANEEL, 2018).

3.1 Distúrbios relacionados a qualidade de energia

Os problemas associados à qualidade de energia elétrica, geralmente se iniciam manifestando em um equipamento alimentado pela rede elétrica deixando de funcionar como deveria. Desta forma, podemos exemplificar motores que sofrem vibrações mecânicas, motores que operam com sobreaquecimento, capacitores com sobretensões ou sobrecorrentes podem ser evidências de perturbações na qualidade da energia.

Segundo Paulilo (2013), os equipamentos e maquinários atuais estão mais sensíveis às variações da qualidade da energia em relação aos utilizados no passado. Muitos dos aparelhos modernos contêm controles microprocessados e/ou unidades eletrônicas de potência, tornando-os muito sensíveis a certos tipos de distúrbios, que por décadas podem ter ocorrido sem causar efeitos adversos e, atualmente, resultam em má operação e, sobretudo, redução da vida útil.

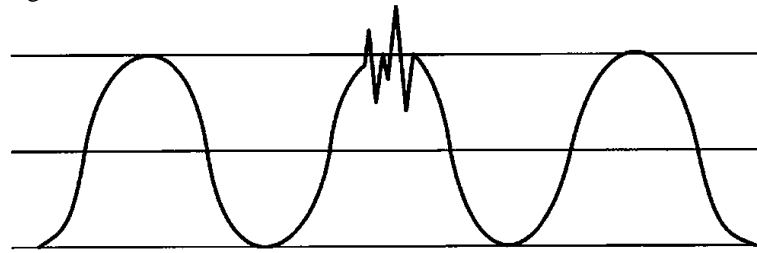
Qualidade de energia elétrica retrata vários eventos eletromagnéticos que representam a tensão e a corrente em um determinado tempo e local do sistema elétrico. A qualidade de energia é afetada por diversos tipos de distúrbios.

3.1.1 Transitórios ou transientes

Para Martinho (2012, p. 65), o termo transitório, também conhecido como transiente, são fenômenos eletromagnéticos a manifestação ou resposta elétrica local ou nas adjacências que se originam em alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Ou seja, os transitórios são variações do sistema de energia que denota um evento indesejável e momentâneo.

Os transitórios acontecem de maneira muito rápida e podem ocorrer por diversas causas, como descargas atmosféricas, chaveamento de cargas indutivas, capacitivas, ou até mesmo funcionamento inadequado de equipamentos. Há duas categorias de transitórios, são eles os impulsivos, que são gerados devido a descargas atmosféricas, e os oscilatórios gerados pelo chaveamento de cargas (MARTINHO, 2012). Na Figura 4 pode-se representar a ocorrência de um transitório em uma senoide.

Figura 4 – Ocorrência de um transitório em uma senoide



Fonte: (Martinho, 2012, p. 65).

Na Figura 4 observa-se um transitório que acontece em qualquer ponto da senoide podendo elevar o valor de pico naquele momento.

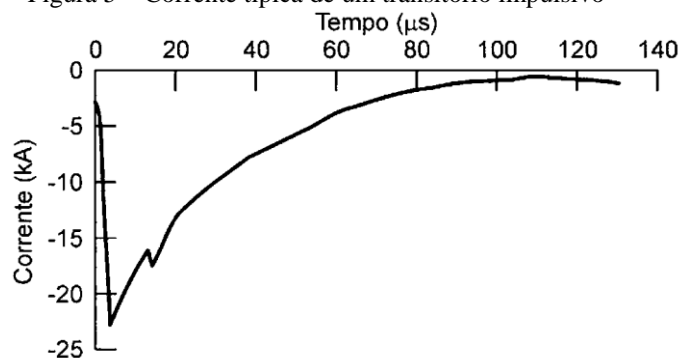
3.1.1.1 Transitório impulsivo

Um transitório impulsivo é uma súbita alteração não desejável no sistema, que se encontra em condição de regime permanente, refletido nas formas de ondas da tensão e/ou corrente, sendo unidirecional na sua polaridade (PAULILO, p. 42).

Os transitórios impulsivos geralmente são definidos por um tempo de subida e outro de descida do impulso, os quais, também, podem ser expressos pelo seu Conteúdo espectral. Para exemplificar, um impulso transitório definido como 1,2. x 50 ms e 2000V, significa que o impulso atinge seu valor máximo de 2000V em um tempo de 1,2 ms e, posteriormente, decai até a metade de seu valor máximo, no tempo de 50 ms. (ARRUDA, 2008, p. 8).

Para Martinho (2012, p. 65), transitórios acontecem pela incidência de uma ou mais descargas atmosféricas, que causam uma alteração indesejável no sistema em regime, apresentando reflexos na forma de onda. A Figura 5 representa a corrente típica de um transitório impulsivo provocado por uma descarga atmosférica.

Figura 5 – Corrente típica de um transitório impulsivo

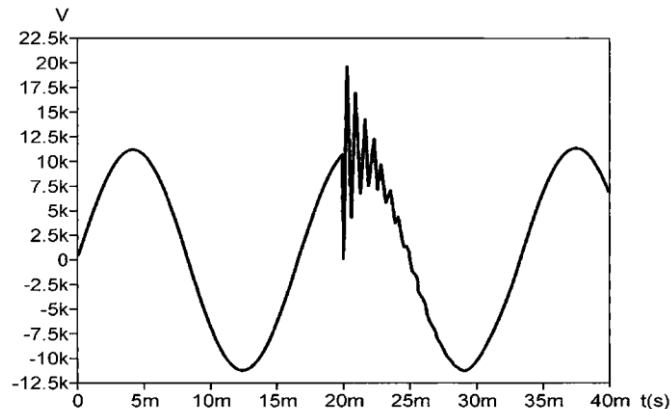


Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 66).

3.1.1.2 Transitório Oscilatório

Transitórios oscilatórios ocorre devido a uma modificação nos padrões de tensão e/ou corrente de forma inesperada. A Figura 6 representa o transitório oriundo de chaveamento de um banco de capacitores.

Figura 6 – Transitório oriundo de chaveamento de um banco de capacitores



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 67).

Pode-se citar como causas frequentes a energização por banco de capacitores, em que uma faixa resultante de oscilação de tensão com frequência entre 300 e 900 Hz é gerada. Essa faixa de oscilação possui magnitude máxima com valores próximos de 2,0 pu, encontrando-se valores relativos de 1,3 a 1,5 pu, possuindo o tempo de 0,5 a 3 ciclos que é dependente do amortecimento do sistema.

3.1.2 Variação de tensão

Podemos descrever as variações de tensão, como a alteração do valor de tensão inicial estabelecido como padrão ou usualmente conhecido como valor nominal, sendo capaz de variar para mais ou para menos. Entendido o significado da variação de tensão, faz-se necessário da associação de um novo critério a esse distúrbio que é o tempo em que a variação ocorre. Ou seja, toda variação deve estar ajustada a uma unidade de tempo que determina o tipo de variação de tensão que existe. A variação de energia é dividida em duas classes: a variação de tensão de curta duração e a variação de tensão de longa duração.

Segundo Martinho (2012, p. 39), “a variação de tensão pode ser causada por inúmeras situações. Uma bastante comum é o chaveamento de cargas de elevada potência que, ao serem acionadas, demandam uma energia muito grande da rede, fazendo com que muitas vezes cause

uma redução da tensão e quando desligada, devolve essa energia para a rede, normalmente aumentando a tensão por um período de tempo”.

3.1.2.1 Variação de tensão de curta duração

A variação de tensão de curta duração é compreendida como sendo o distúrbio que acontece entre 0,5 ciclo e um minuto, isto é, se houver reduções do valor nominal da tensão durante 30 segundos a variação de tensão é denominada como sendo de curta duração.

As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas por condições de falta, energização de grandes cargas as quais requerem altas correntes de partida ou por intermitentes falhas nas conexões de cabos do sistema. Dependendo do local da falta e das condições do sistema, a falta pode causar tanto um afundamento de tensão temporário, como uma elevação de tensão, ou ainda uma interrupção completa do sistema elétrico. (ARRUDA, 2003, p. 11).

De acordo com a PRODIST (2018, p. 20), as variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação das variações de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: (PRODIST, 2018, p. 20).

3.1.2.2 Variação de tensão de longa duração

A variação de tensão de longa duração pode ser entendida quando a variação de tensão acontece ao longo de um período maior do que um minuto.

Para Paulilo (2013, p. 30), as variações de tensão de longa duração são fenômenos semelhantes aos fenômenos de curta duração, porém, com a característica de se manterem no sistema elétrico por tempos superiores a três minutos. São causadas por saídas de grandes blocos de carga, perdas de fase, dentre outras.

3.1.3 Surto de tensão ou *Spike*

Surtos de tensão normalmente são confundidos com os transitórios, em razão de ser o aumento rigoroso e rápido da tensão da rede elétrica causado na maioria das vezes por descargas atmosféricas. As causas podem ser divididas em surto induzido ou indireto e surto conduzido ou direto. Essas são consideradas as principais causas.

De acordo com Martinho (2012), o surto conduzido ou direto ocorre quando a descarga atmosférica reflete diretamente sobre a instalação, ou em locais bem perto da edificação. Assim, os eletrodos e outros elementos metálicos que ali existem passam por uma elevação de potência por frações de segundos, o que causa a circulação de correntes de surto por toda a instalação elétrica.

Ainda de acordo com Martinho (2012), o surto induzido ou indireto é definido pela ocorrência de descargas atmosféricas que alcançam as linhas de transmissão ou distribuição de energia, ou por meio da indução da descarga em componentes próximos das redes, como por exemplo estruturas metálicas ou árvores.

Assim, as soluções para estes surtos possuem grande semelhança às soluções para os transitórios, o uso de DPS é uma delas.

3.1.4 Variação de frequência

Variações na frequência de um sistema elétrico são os desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (ARRUDA, 2003).

A variação de frequência tem o poder de atingir forma agressiva equipamentos que possuem sensibilidade. Sua regulamentação permite que seja no máximo de 0,5Hz para os 60Hz

no Brasil, no entanto a dificuldade está nos sistemas de geração própria, onde a regulamentação não possui a permissão de supervisionar (MARTINHO, 2012).

De acordo com a norma regulamentadora o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. (PRODIST, 2018, p. 19).

Quando houver ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, a frequência de retornar, no tempo de trinta segundos após o ocorrido, para a faixa de 59,5Hz a 60Hz, para que se tenha a possibilidade de recuperar o equilíbrio carga-geração. (PRODIST, 2018, p.19).

Referindo-se aos cortes de geração, caso há necessidade, a frequência não pode exceder de 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz. A frequência poderá permanecer acima de 62Hz no intervalo de tempo máximo de trinta segundos e acima de 63,5Hz no intervalo de tempo máximo de dez segundos. A frequência abaixo de 58,5 Hz tem a permissão de permanecer por no máximo 10 segundos e um valor que seja inferior a 57,5 Hz num período máximo de 5 segundos. (PRODIST, 2018, p. 19).

3.1.5 Desequilíbrio de tensão

Desequilíbrios de tensão são fenômenos reconhecidos por diferenças nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de 120° entre as fases. A Equação 8 dada pela PRODIST (2018, p. 16), representa o cálculo do desequilíbrio de tensão.

$$FD\% = \frac{V-}{V+} \times 100 \quad (8)$$

Onde,

$FD\%$ = Fator de desequilíbrio de tensão

$V-$ = Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental

$V+$ = Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2016) o desequilíbrio de tensão deve-se ter como base de referência uma terminologia, metodologia de medição, instrumentação e valores de referência para tal desequilíbrio. Uma metodologia de medição deve ser eficaz a ponto de coletar informações por meio de recursos computacionais.

Para a PRODIST (2018), um valor de referência deve ser inferior a 2%, com exceção da Baixa Tensão. Esse valor é referência base para um planejamento elétrico em termos de qualidade de energia, que será apresentado como uma resolução específica, após coleta de dados em período de experiência. Na Tabela 1, segundo a PRODIST (2018, p. 17), indica os limites para os desequilíbrios de tensão.

Tabela 1 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: (PRODIST, 2018, p. 17).

O FD95% é o valor indicador superado dentre as leituras válidas.

3.1.7 Ruído

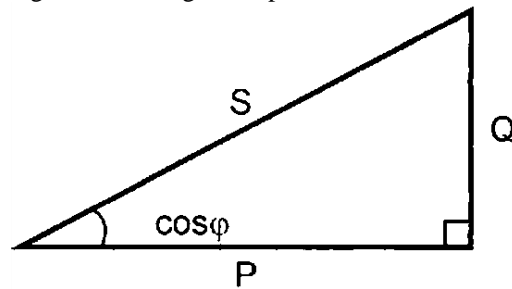
É considerado um dos distúrbios mais difíceis de serem solucionados, isso se deve por se originarem de diversas fontes e atinge os equipamentos de forma intensa. O ruído é considerado como sendo a distorção da tensão senoidal, que surge por meio da superposição de alta frequência (em MHz). Podemos classificar os ruídos em dois tipos, os comuns e os normais. Os ruídos normais possuem diferenças da tensão que acontecem entre o condutor fase e neutro. Já os ruídos comuns são as diferenças da tensão que acontecem entre o condutor neutro e terra.

Segundo Santos (2011, p. 28), os problemas de ruído são frequentemente agravados pelo aterramento inadequado. Ou seja, o ruído basicamente é representado por qualquer distorção indesejável do sinal de potência que não pode ser classificado como distorção harmônica ou transitória.

3.1.6 Redução do fator de potência

De acordo com Martinho (2012), para o entendimento da redução do fator de potência deve-se primeiramente entender os conceitos do termo fator de potência. Sucintamente, o fator de potência é o ângulo de defasagem entre a potência ativa e a potência aparente no triângulo de potências mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Triângulo de potências



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 12).

Onde,

S = Potência aparente (VA)

P = Potência ativa (W)

Q = Potência reativa (VAR)

Potência aparente pode ser definida como toda potência que será utilizada de uma fonte geradora de energia, sendo assim a soma vetorial da potência útil P (ativa) com a potência reativa (Q). O módulo e ângulo podem ser calculados pela Equação 9.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ onde o ângulo } \phi = \text{tg}^{-1}(Q/P). \quad (9)$$

Onde,

S = Potência aparente (VA)

P = Potência ativa (W)

Q = Potência reativa (VAR)

O valor do fator de potência pode ser calculado mediante aos valores das potências ativa e reativa (P e Q) utilizando a Equação 10.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (10)$$

Onde,

FP = Fator de potência

P = Potência ativa (W)

Q = Potência reativa (VAR)

Potência ativa é a potência que é utilizada para trabalho. É representada por P e a sua unidade é *watt*.

Potência reativa é a componente da potência aparente que não realiza trabalho.

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e

dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente. (PRODIST, 2018, p. 13).

Analisando no âmbito industrial, a redução do fator de potência geralmente ocorre quando a indústria possui máquinas de grande porte elétrico.

De acordo com Martinho (2012), são utilizados alguns métodos para correção do fator de potência, como capacitores que minimizam o reativo na rede elétrica. Efetivamente, uma consultoria se torna de grande importância para averiguar possíveis problemas causados pelo reativo, como levantamento das cargas presentes, tempo de atuação de cada carga e como elas reagem a tensão aplicada a si mesma. Existem três possibilidades de inserção de capacitores de maneira que trabalhem em diferentes situações, dentre eles há:

- a) Banco fixo de capacitores: São ligados diretamente aos barramentos. Possui um baixo custo na instalação, e por esse motivo é conhecido como um fator problemático por trabalhar com cargas abundantemente dinâmicas, excedendo por compensação (MARTINHO, 2012).
- b) Banco semiautomático: Pode ser comparado com o banco fixo, e é um tipo de instalação feita juntamente com as cargas. Cada banco de capacitores irá atender a um grupo de cargas (entrada e saída). Possui custo elevado, o que leva a um maior investimento. Pode acontecer também, na maioria das situações, o chaveamento excessivo dos capacitores em carga, muitas vezes não chegando a descarregar, danificando os dispositivos (MARTINHO, 2012).
- c) Banco de acionamento automático de capacitores: É a situação que possui o preço mais elevado de todos os três tipos. É indicado para cargas que sejam mais dinâmicas. Seu funcionamento baseia-se em pequenos bancos que são acionados independentes. Cada capacitor é acionado de modo que melhore a eficiência do circuito com o fator de potência, e esse acionamento é feito por um gerenciador em função de dados captados na medição de corrente de carga (MARTINHO, 2012).

4 HARMÔNICAS

A expressão Harmônica é utilizada para retratar a distorção de uma forma de onda senoidal. Ou seja, uma senoide que possui frequência fundamental de 60Hz, se obter formas distorcidas ou atípica, há possibilidades de possuir componentes harmônicas.

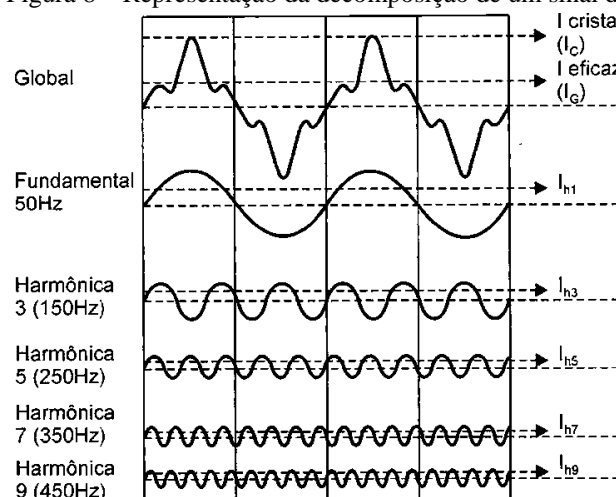
As fontes que geram harmônicas no sistema de energia são muito variadas, levando em conta a quantidade de equipamentos não somente de concessionárias, como também dos consumidores, especialmente os industriais, que formam uma parcela significativa da carga fornecida.

Fourier determinou essa deformação da seguinte forma: toda função periódica e não senoidal pode ser representada pela soma de expressões série que é composta por uma expressão senoidal em frequência fundamental e por expressões senoidais cuja frequência de cada senoide é múltipla da senoide fundamental (harmônica) e de uma eventual componente contínua. (MARTINHO, 2012, p. 78). A Figura 8 representa a decomposição de um sinal distorcido.

Então, em outras palavras, as harmônicas são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (especificada em 60Hz no Brasil) na qual opera o sistema de energia elétrica.

Os dispositivos que geram harmônicas são exibidos em qualquer setor industrial, comercial ou doméstico. As harmônicas são resultadas de cargas não lineares.

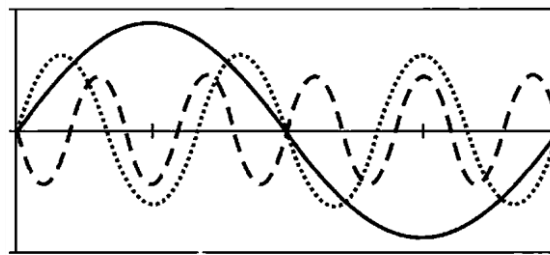
Figura 8 – Representação da decomposição de um sinal distorcido



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 78).

O somatório de várias frequências em uma senoide torna a forma de onda inicial distorcida, isso pode ser representado na Figura 9 (a) e 9 (b).

Figura 9 (a) – Presença de terceira e quinta harmônica no sinal fundamental

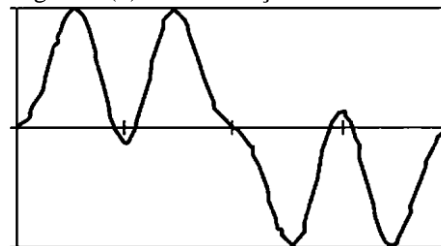


— Fundamental
 Global harmônica
 --- Fundamental harmônica

Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 79).

Como se pode ver, o somatório dos sinais de 60Hz com os sinais de 180 e 300Hz distorce o sinal original, deixando de ser uma senoide, se tornando em um sinal periódico simples.

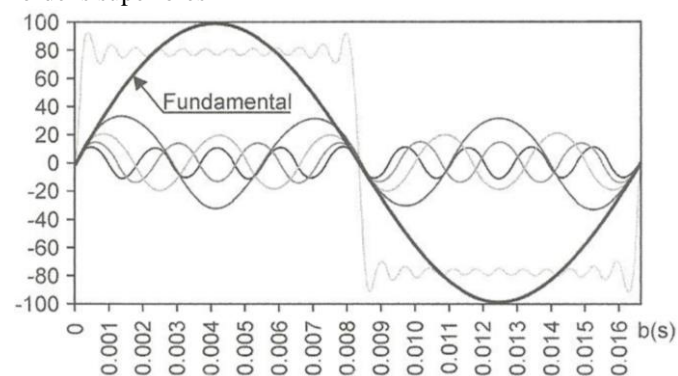
Figura 9 (b) – Deformação da senoide fundamental



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 79).

Um outro exemplo pode ser mostrado na Figura 10. O sinal senoidal deformado acontece tanto no sinal de tensão, quanto no sinal de corrente, em vista disso são tratados como harmônicos de tensão e harmônicos de corrente. A Figura 10 nos apresenta a deformação de um sinal senoidal fundamental pela presença de várias senoides de ordens superiores.

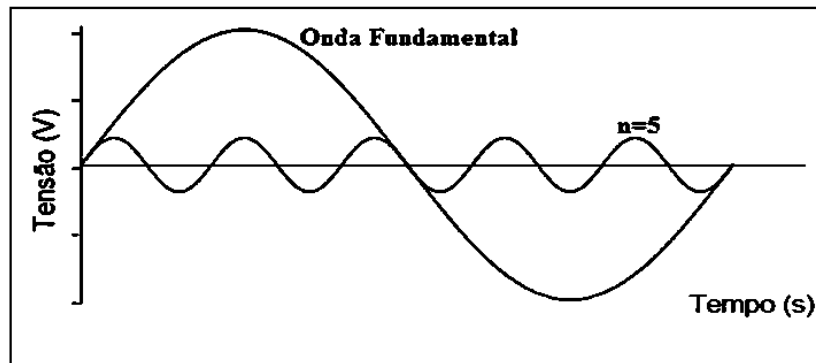
Figura 10 – Deformação de um sinal fundamental pela presença de várias senoides de ordens superiores



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 79).

Para Martinho (2012), os harmônicos, diferente da maior parte dos distúrbios apresentados anteriormente, são constantes de natureza própria e não temporários, ou seja, os harmônicos são diferentes dos transitórios, afundamentos de tensão ou elevações. O fato dos harmônicos serem um fenômeno permanente requerem um uma importância maior em seu tratamento, portanto os cuidados necessitam de soluções mais aprofundadas. A Figura 11 representa a componente fundamental da tensão e sua quinta harmônica.

Figura 11 – Onda fundamental com sua harmônica $n = 5$



Fonte: (OLIVEIRA, 2011, p.50).

Em resultado, a Figura 12 representa a forma de onda resultante da tensão, que é a junção da componente fundamental com sua quinta harmônica.

Figura 12 – Onda resultante da soma da onda da tensão e da harmônica $n = 5$



Fonte: (OLIVEIRA, 2011, p.51).

A alteração na forma de onda é um tipo característico de distúrbio, que é geralmente associado com a sucessiva quantidade de acionamentos que incluem conversores de frequência, fontes chaveadas e vários outros dispositivos eletrônicos.

4.1 Parâmetros e cálculos de harmônicas

As harmônicas que possuem seu formato de onda de tensão ou corrente podem ser projetadas com elementos senoidais de frequências múltiplas da frequência fundamental. Essa afirmação é aplicada pela Equação 11.

$$f_h = (h) \times (f_{fundamental}) \quad (11)$$

Onde,

f_h = Frequência da harmônica.

h = Ordem harmônica.

$f_{fundamental}$ = Frequência fundamental da rede.

As distorções harmônicas se mostram em grande crescimento com o passar do tempo em ambientes industriais, isso se deve pelo aumento de cargas não lineares. Consequentemente, a redução dos harmônicos se tornaram cada vez mais necessário. Os harmônicos são divididos em sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. As correntes harmônicas de sequência positiva constituem as harmônicas de ordem 7^a, 13^a e 19^a. As harmônicas de sequência negativa são as de ordem 5^a, 11^a, 17^a e auxiliam para o aumento do índice de Distorção harmônica Total (THD) do sistema. Logo as correntes harmônicas de sequência zero pertencem a ordem múltipla de três, bem como 3^a, 9^a e 15^a, que circulam pelo condutor neutro e são capazes de causar superaquecimento do fio.

Cada harmônico tem a sua fase e o seu módulo. Em geral, nos sistemas elétricos, os harmônicos de ordem par são nulos, devidos aos dispositivos que atuam de forma simétrica e periódica. Os harmônicos de ordem elevada são pequenos, fundamentalmente porque as variações são suavizadas pela presença de indutância no sistema. A presença de harmônicos pares é sintoma de que o controle dos semicondutores está desajustado e a existência de harmônicos elevados pode ser indício de variação brusca de tensão ou corrente. (RIBEIRO, 2007, p. 22). O Quadro 2 resume as terminologias aplicáveis aos cálculos das distorções harmônicas.

Quadro 2 – Terminologias aplicáveis aos cálculos das distorções harmônicas

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT _h %
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTT _P %

Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTT _i %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT ₃ %
Tensão harmônica de ordem h	V _h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	hmáx
Ordem harmônica mínima	hmin
Tensão fundamental medida	V ₁
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT 95%
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT _p 95%
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT _i 95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT ₃ 95%

Fonte: (PRODIST, 2018, p.14).

A distorção harmônica individual de tensão de ordem h pode ser calculada por meio da Equação 12.

$$DIT_h \% = \frac{v_h}{V_1} \times 100 \quad (12)$$

Onde,

h = ordem harmônica individual.

A distorção harmônica total de tensão pode ser calculada por meio da Equação 13.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (13)$$

Onde,

h = todas as ordens harmônicas de 2 até hmáx.

$h max$ = conforme a classe A ou S.

A distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 pode ser calculadas pela Equação 14.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (14)$$

Onde,

h = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20\dots$)

h_p = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

A distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 pode ser calculada por meio da Equação 15.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (15)$$

Onde,

h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19\dots$)

h_p = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

É possível calcular a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 por meio da Equação 16.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (16)$$

Onde,

h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30\dots$)

h_p = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Assim, a regulamentação estabelece limites para as distorções harmônicas totais, em porcentagem da tensão fundamental, como informa a Tabela 4. Segundo a PRODIST (2018, p. 16), os limites correspondem ao máximo desejável a ser observado no sistema de distribuição. No caso de medições utilizando-se TPs com conexão tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador $DTT_{395\%}$ deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicadores no Quadro 3.

Quadro 3 – Limites das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69\text{kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10%	8%	5%
$DTT_{p95\%}$	2,5%	2%	1%
$DTT_{i95\%}$	7,5%	6%	4%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5%	3%

Fonte: (PRODIST, 2018, p. 15).

As harmônicas geralmente são encontradas onde há redes trifásicas, e são consideradas as mais inconveniente as harmônicas de ordens ímpares. Segundo Schneider (2003), as correntes harmônicas de ordem superior a 50, são desprezíveis e sua medição é desnecessária. Os distribuidores de energia monitoram as harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11 e 13.

4.2 Princípios técnicos das harmônicas

Como dito anteriormente, em outras palavras as ondas consequentes da distorção harmônica são ondas não-senoidais, que se desenvolvem na mesma frequência e período da onda fundamental do sistema. Assim, as distorções harmônicas são fenômenos constantes e estacionários, isto é, as harmônicas são presentes quando sua fonte que a origina estiver em trabalho ou operação, a menos que não sejam aplicados meios para sua eliminação ou minimização.

O modo mais comum e bastante utilizado de expressar uma distorção harmônica é a Distorção Harmônica Total ou DHT. Na maioria das vezes a sigla da Distorção Harmônica Total é comumente utilizada tanto para distorções de corrente, quanto para distorções de tensão. A mesma é normalmente expressada/dada em percentual, representando a distorção de um conjunto de todas as harmônicas quem compõem certa onda resultante e pode ser calculada através da Equação 17.

$$DTH\% = \frac{\sqrt{\text{Somatório dos quadrados de todas as amplitudes das harmônicas presentes}}}{\text{Amplitude da onda fundamental}} \times 100 \quad (17)$$

Até o momento, foram apresentadas as equações para distorções harmônicas de tensão, mas existem também meios para calcular harmônicas de corrente, que pode ser expressado na Equação 18.

$$DHI_T = \frac{\sqrt{\sum_2^n I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (18)$$

Onde,

n = ordem harmônica (3^a, 5^a, 7^a, entre outras, devendo também ser consideradas as ordens pares se existirem).

I_n = corrente harmônica de ordem “n”, valor eficaz (RMS)

I_1 = corrente fundamental em Amperes, valor eficaz (RMS)

Analisando as equações mostradas até o momento, pode-se notar que para se obter os valores das distorções harmônicas totais ou individuais que compõem um determinado sistema, é necessário que determine os valores de cada elemento harmônico individualmente, ou melhor dizendo, se faz necessário a realização de medições exigidas consideradas específicas e essenciais.

Para medir a tensão e corrente à frequência fundamental pode-se utilizar volt-ampérimetros portáteis do tipo alicate, não apresentando grandes dificuldades no ato. Porém, quando se é preciso medições de tais grandezas elétricas para análises de composições harmônicas, é de grande importância o uso de uma instrumentação adequada, capaz de captar e apresentar com clareza e precisão as correntes e tensões de todas as faixas de frequência de interesse. (ISONI, 2005). Geralmente tais medições são possíveis mediante a Analisadores de Harmônicas ou Analisadores de Qualidade de Energia. Esses equipamentos possuem uma diferença dos equipamentos convencionais, ou seja, possuem o poder de captar o valor eficaz real da corrente e da tensão em determinadas faixas de frequência estabelecida pelo fabricante. Isso o torna confiável ao utilizá-lo em medições de harmônicas. Analisadores de harmônicas são recomendáveis em indústrias, cujos os aparelhos devem possuir largura de frequência de limites superiores a 1020Hz, frequência essa pertencente à 17ª harmônica.

4.3 Classificação das harmônicas

Segundo Annuniação (2011, p. 51), sinais de tensão ou corrente com a presença de harmônicas apresentam comportamento periódico. Estes sinais possuem além da frequência dita fundamental, frequências múltiplas inteiras desta, portanto, a forma de onda apresenta-se deformada em relação a um sinal puramente senoidal. As harmônicas podem ser classificadas quanto a sua ordem ou frequência e sequência de fase, conforme o exemplo mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Ordem, frequência e sequência de harmônicas

Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Frequência (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fonte: (ANNUNCIACÃO, 2011, p. 51).

Pode-se analisar no Quadro 4 que as harmônicas podem ser de sequência positiva (+), negativa (-) e zero (0).

4.4 Equipamentos geradores de harmônicas

Antigamente as distorções harmônicas em sistemas de potência eram primeiramente ligadas ao projeto e funcionamento dos transformadores e máquinas elétrica. Efetivamente, a fonte principal de distorções harmônicas era correntes de magnetização dos transformadores. Segundo Teixeira (2009), os geradores elétricos constituíam a segunda fonte de harmônicos, uma vez que aspectos práticos e econômicos de projeto requeriam que alguns desvios da forma de onda senoidal ideal fossem aceitos. Assim, o uso de equipamentos eletrônicos aumentou e conseqüentemente aumentou-se de modo significativo as cargas não lineares no sistema elétrico. Por essa razão, entre as importantes fontes geradoras de harmônicos, os conversores estáticos de potência ganharam um grande destaque.

Além dos conversores estáticos de potência, outras cargas não lineares se destacaram, como por exemplo, os compensadores estáticos de reativos, os fornos elétricos a arco, entre outros. Estes, são membros do grupo de equipamentos potentes que geram harmônicos para o sistema elétrico.

4.4.1 Cargas geradoras de harmônicas

Cargas não lineares são presentes em grande parte de equipamentos de todos os portes, e geram distorções em forma de onda, modificando as ondas de tensão e corrente. Ou seja, geram harmônicas. No presente, os consumidores do ramo industrial utilizam potências elevadas, e trabalham com a utilização de motores, inversores de frequência, acionadores, conversores e diversos outros equipamentos que geram grande quantidade de distorções harmônicas, em que são denominados como os principais geradores de harmônicas. Nota-se que consumidores comerciais acabam gerando muito mais harmônicos que os consumidores residenciais, devido a necessidade da utilização de muitas lâmpadas fluorescentes, redes de computador, equipamentos eletrônicos, máquinas, entre outros (NERY; HOPNER, 2016, p. 26).

Para motores elétricos, de acordo com as suas funções de características próprias e especialmente quando são sujeitos a tensões mais altas que o projeto, podem receber da rede

correntes elétricas distorcidas. Essas distorções possuem características harmônicas nas quais sua frequência é dependente do número de ranhuras que compõem o estator e rotor.

4.5 Perturbações causadas por harmônicas

As harmônicas percorrem nos sistemas prejudicando a qualidade de energia, e a partir daí são gerados diversos prejuízos. Segundo Schneider (2003, p. 6), esses prejuízos são citados a seguir.

- a) Sobrecarga das redes de distribuição por aumento da corrente eficaz;
- b) Sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das harmônicas de ordem 3 geradas pelas cargas monofásicas;
- c) Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores;
- d) Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa;
- e) Deformação da tensão de alimentação podem perturbar receptores sensíveis;
- f) Perturbações das redes de comunicação ou das linhas telefônicas.

4.5.1 Impacto econômico das perturbações

Com a presença de harmônicas geram-se perdas muito grandes de energia, tendo como consequência alguns danos que podem ser severos nas componentes do sistema.

Diante das perturbações mencionadas anteriormente, pode-se destacar alguns aspectos econômicos que geram grandes impactos. Segundo Schneider (2003, p. 6), esses impactos econômicos são:

- a) O envelhecimento precoce do material, que pode levar a substituí-lo após um certo tempo;
- b) As sobrecargas da rede aumentam a potência necessária;
- c) As deformações da corrente provocam disparos intempestivos e a parada das instalações da produção;
- d) Perdas energéticas;
- e) Custo adicional da contratação de serviços;
- f) Sobre dimensionamento dos materiais;
- g) Redução da vida útil;

Assim, podemos concluir que, mediante a estas perturbações e entre outras, causam custos de material, perdas energéticas e perda de produtividade, ocasionando também uma baixa competitividade das empresas.

A redução de vida útil dos materiais se apresenta quando a tensão de alimentação possui uma taxa de distorção próxima de 10%, ou seja, a duração da vida dos aparelhos é reduzida de forma sensível. Segundo Schneider (2003), de acordo com o tipo de aparelho, estima-se a redução de vida útil em 32,5% para máquinas monofásicas, 18% para as máquinas trifásicas e 5% para transformadores.

4.6 Harmônicas em máquinas elétricas

Geradores e motores, assim como outros equipamentos, podem sofrer influência de elevadas distorções harmônicas de forma considerável. As distorções de tensão nos terminais das máquinas produzem fluxos harmônicos que, por sua vez, levam correntes harmônicas para o rotor. Em consequência disso, pode-se gerar o sobreaquecimento, além de diminuir o rendimento, vibração e ruído. Entretanto, o efeito que ganha destaque é o aumento das perdas no cobre e no ferro das mesmas, causando elevações de temperatura nas barras do rotor e nos enrolamentos do estator (TEIXEIRA, 2009). Existem também, além da elevação de temperatura, as correntes harmônicas que causam conjugados pulsantes devido a interação entre as correntes harmônicas e ao campo magnético em sua frequência fundamental. Os valores destes conjugados são bem próximos aos valores das correntes harmônicas correspondentes, ou seja, uma corrente harmônica que possui uma amplitude de 10% da corrente fundamental gerará um conjugado de 10% do seu valor nominal.

4.6.1 Análise harmônica no motor de indução trifásico

Tensões harmônicas empregadas pelas máquinas assíncronas podem acarretar na circulação de correntes com frequências acima de 60Hz no rotor. Estas correntes são causadoras de perdas complementares.

4.6.1.1 Efeitos sobre os motores de indução

As inserções de equipamentos relacionados à eletrônica de potência como meio para conscientização energética de instalações elétricas podem ocorrer quando surgem distorções

harmônicas que, no que lhe diz respeito, podem causar efeitos imediatos e com o passar do tempo, gerar falhas indesejáveis.

A existência de harmônicos na tensão de alimentação de motores de indução geram as correntes harmônicas, que provocam a elevação de perdas no cobre e no ferro. As perdas no ferro se dividem em perdas por correntes de Foucault e perdas por histerese. O aumento dessas perdas acontece devido a circulação de grandes níveis de correntes parasitas nas chapas do núcleo do rotor, estator (perdas variáveis com o quadrado da frequência) e da geração de calor a mais no ferro da máquina devido à elevação da velocidade de alternância magnética e do aumento de atrito entre os dipolos magnéticos da chapa do núcleo. (ISONI, 2005).

Existem diversas outras consequências causadas pelas harmônicas nos motores elétricos, como por exemplo efeitos indesejáveis e prejudiciais à operação dos mesmos. Isso acontece perante harmônicas de sequência negativa e de ordem 5, gerando torques no sentido oposto ao criado pela onda fundamental, desviando-se para a redução da capacidade de acionamento da carga mecânica fixa ao eixo girante. Para Isoni (2005), os efeitos são interpretados pelo motor como sendo um acréscimo de carga no eixo, o que provoca a absorção de parcela adicional de corrente no estator. Caso a carga seja alta e as proteções de sobrecorrente encontrem-se mal dimensionadas ou não capturem corretamente a presença das harmônicas, há possibilidade de queima do motor.

Conforme Isoni (2005, p. 22), um outro efeito também detectável quando a presença de harmônicas consiste no aumento do ruído audível (devido a vibrações adicionais) quando comparado com o ruído percebido perante a aplicação de tensão não distorcida.

5 FATOR DE POTÊNCIA E HARMÔNICAS

Mediante a participação de harmônicas em um determinado sistema, as grandezas elétricas deixam de ser puras e lineares, o que ocasiona no surgimento de um desvio entre o Fator de Potência e o $\text{Cos}\varphi$ (ISONI, 2005).

5.1 Interpretação do valor do fator de potência na presença de harmônicas

Como indicado anteriormente, o fator de potência é igual a associação entre a potência ativa P e a potência aparente S , como mostra na Figura 8, e pode ser calculado pela Equação 19.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (19)$$

Onde,

P = potência ativa;

S = potência aparente;

FP = fator de potência.

Na eletricidade, costuma-se com grande frequência confundir com o $\text{cos}\varphi$, no qual sua representação pode ser definida pela Equação 20.

$$\text{Cos}\varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (20)$$

Onde,

P_1 = potência ativa fundamental;

S_1 = potência reativa fundamental;

$\text{Cos}\varphi$ = é relacionado especialmente a frequência fundamental, e, com a presença de harmônicas, possui grande diferença do fator de potência FP .

Quando o sistema possui harmônicos de forma significativa têm-se a possibilidade de ser um fator de potência (FP) medido, no qual seu valor será abaixo ao valor do $\text{cos}\varphi$.

Então, conclui-se que o fator de potência irá ser igual ao $\text{cos}\varphi$ apenas para senoides puras, seja de tensão ou corrente. Quanto mais alto o nível de harmônicas de um sistema for, mais complexo será o trabalho de correção do fator de potência.

Atualmente as normas técnicas brasileiras regulamentam o fator de potência mínimo de uma instalação elétrica em 92% e em algumas classes de equipamentos este limite chega a 97%. (OLIVEIRA, 2011, p. 51).

5.2 Potência de distorção

O item 3.1.6 deste trabalho revela alguns aspectos básicos referentes a potência ativa, potência aparente e potência reativa, mas não nos traz o conceito da potência de distorção. Pois bem, em consequência da presença de harmônicas, a expressão que define a potência aparente ($S^2 = P^2 + Q^2$) não será válida. Então, define-se que a potência de distorção D pode ser calculada pela Equação 21.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (21)$$

Onde,

S^2 = potência aparente;

P^2 = potência ativa;

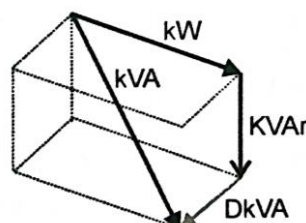
Q^2 = potência reativa;

D^2 = potência de distorção.

Fator de distorção significa a quantidade de distorção harmônica que permanece em uma forma de onda logo após as suas harmônicas serem submetidas a uma redução de segunda ordem. Logo, o fator de distorção pode ser considerado como sendo uma ação que reduz harmônicas indesejadas, sem precisar detalhar valores de filtros da carga de segunda ordem (OLIVEIRA, 2011).

“O valor do fator de potência real é sempre menor que o fator de potência de deslocamento, sendo que a correção deverá ser feita pelo fator de potência real.” (OLIVEIRA, 2011, p. 52). A Figura 13 possui uma visualização espacial das potências em um sistema com harmônicas.

Figura 13 – Potências em um sistema com harmônicas



Fonte: (MARTINHO, 2012, p.84).

Então, quando há mudanças no fator de potência, com o surgimento de harmônicas, o cálculo do fator de potência tradicional ganha mais uma dimensão, ou seja, a partir desse fenômeno, a carga terá, além das potências ativa e reativas, uma potência de distorção. A partir daí o cálculo do fator de potência já não poderá ser dado pelo cosseno do ângulo formado pelas potências ativa e aparente (MARTINHO, 2012). Deve-se então, levar em consideração as harmônicas ali presentes, como representa na Equação 22.

$$FP = \frac{\cos\varphi^1}{\sqrt{1 + THD(I)^2}} \quad (22)$$

Onde,

FP = fator de potência;

$\cos\varphi$ = ângulo;

THD = taxa de distorção harmônica;

Isso nos mostra as complicações que a presença de correntes harmônicas pode causar em um determinado circuito. Mas, por ser um problema onde não se consegue eliminar, onde há cargas lineares no circuito e não podem ser facilmente eliminadas, surge a necessidade de empenho para solucioná-lo. Para isso pode-se adotar métodos de correção ou diminuição de tais eventos. Métodos esses chamados de filtros, que podem ser passivos, ativos ou híbridos.

6 FILTROS

De maneira resumida, existem duas maneiras de reduzir os efeitos das correntes e tensões harmônicas. Primeiramente é trabalhar onde surge o problema, ou seja, desenvolver ou aderir equipamentos que tenham filtros, ou algo que minimize o desenvolvimento de harmônicas no interior do sistema. Dessa maneira a geração de harmônicas se reduzirá e, portanto, os problemas também reduzirão. Mas essa maneira de redução de harmônicas possui um custo elevado.

Os filtros são utilizados como proteção, desviando correntes de determinadas frequências para outro local, como por exemplo a terra, ou apenas trancá-los em determinada região. Sendo assim, segundo Martinho (2012), é possível que se avalie o uso de filtros em alguns controles da qualidade de energia, como no caso de amenizar/controlar surtos ou harmônicas. Os filtros são divididos em ativos, passivos e híbridos.

6.1 Filtros ativos

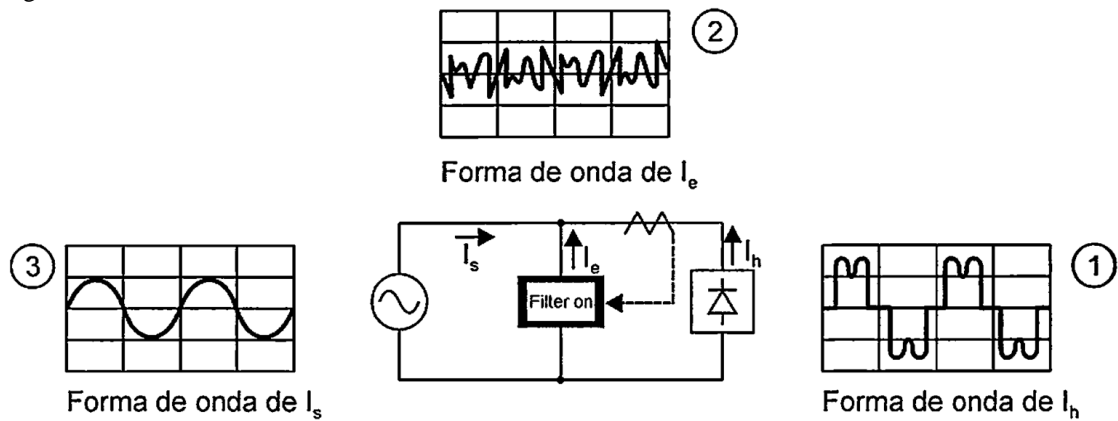
Os filtros ativos são comumente utilizados para tratar fenômenos, como por exemplo as harmônicas. É um filtro basicamente composto por transistores com tecnologia IGBT (transistores de alta velocidade com porta isolada) e possui a função de aplicar na rede uma forma de onda que seja o contrário da forma de onda das harmônicas presentes no circuito.

Segundo Martinho (2012, p. 117), há uma anulação dos sinais com frequências diferentes da fundamental, restando somente o sinal com 60Hz. Assim, essa técnica é possível somente pela tecnologia IGBT permitindo que a avaliação de um sinal presente e também a inserção do sinal contrário sejam on-line.

Um filtro ativo para a eliminação de harmônicas disponíveis no mercado realiza uma avaliação de sinais com frequência até a 51ª ordem, sendo assim, na frequência até $60 \times 51 = 3060\text{Hz}$.

Tendo em mãos estes dados, interpreta-se que o filtro utiliza a própria energia do circuito para a inserção da onda contrária que irá eliminar as harmônicas ali existente. Isso pode ser representado pela Figura 14.

Figura 14 – Funcionamento do filtro ativo



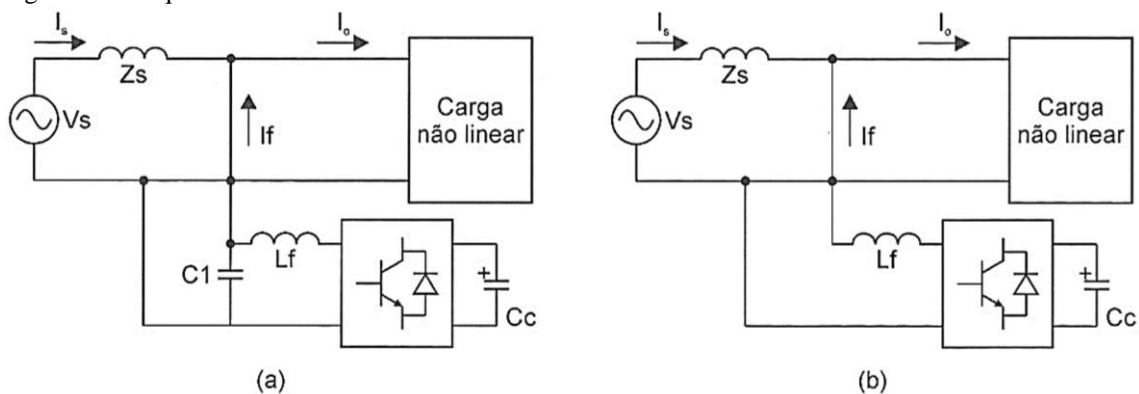
Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 118).

A Figura 14 possui 3 estágios que exemplifica a maneira que o filtro ativo trabalha. O primeiro estágio nos revela a medição da corrente harmônica gerada pela carga. Em seguida o segundo estágio representa a injeção de correntes harmônicas de fase oposta em relação à carga. E por fim, o terceiro estágio, representando a corrente harmônica gerada pela carga sendo cancelada.

Conforme Martinho (2012, p. 118), os filtros ativos podem ser classificados de várias maneiras, ou seja, a classificação dos filtros pode ser por meio do nível de potência, técnicas de controle ou sistema elétrico (trifásico ou monofásico, 3 ou 4 fios), dentro deste último critério e os mais comuns aplicados no mercado os filtros podem se dividir em paralelos, série e híbridos.

No Brasil, o sistema que é mais utilizado é o sistema paralelo na especificação do sistema elétrico. De acordo com Martinho (2012, p. 118), a Figuras 15(a) e 15(b) representam as configurações mais comuns do sistema.

Figura 15 – Esquema do filtro ativo



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 118).

O sistema da Figura 15(a) a tensão de entrada e a corrente de carga são monitoradas já na Figura 15(b) a corrente e a tensão de entrada são monitoradas. Apesar de não possuírem diferenças elevadas, esses sistemas possuem a capacidade de compensar potências reativas de harmônicas e de fundamental. Podem também elevar o fator de potência, diminuindo a presença de correntes harmônicas.

Diferente dos sistemas passivos, os filtros ativos são independentes dos parâmetros da rede, exceto pela tensão, pois vão alimentar os circuitos eletrônicos de controle. O filtro ativo é um sistema totalmente dinâmico que acompanha a variação do sistema. Por ser um sistema praticamente on-line, qualquer alteração da característica da rede é avaliada momentos antes de gerar a forma de onda a ser injetada na rede para a correção (MARTINHO, 2012, p. 119).

O dimensionamento de um filtro ativo é realizado pela corrente de harmônica, isto é, a distorção harmônica total (THD) que se faz presente no circuito. Para exemplificar, aborda-se um circuito que há vários drivers e a corrente de carga total é de 300A. Assim, realizando a medição de harmônicas, detecta-se que o circuito possui uma distorção harmônica total de corrente de 30%. Nessa situação os cálculos não possuem níveis de dificuldades, então: $300A \times 30\% = 100A$, isto é, o filtro a ser adotado é para 100A, para que o mesmo consiga eliminar por completo as correntes harmônicas presentes.

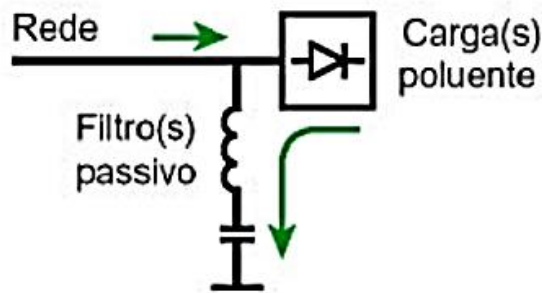
6.2 Filtros passivos

Os filtros passivos são compostos por um conjunto de resistência, indutância e capacitância. É um dispositivo sintonizado, a partir da sua construção, até uma certa faixa de frequência. Segundo Martinho (2012), o ponto de instalação e o tipo do filtro a ser utilizado depende de muitos fatores, como sua aplicação. Quando se precisa de filtros para controlar harmônicas, a instalação sugerida é aquela que possui mais proximidade da carga deformante, dado que o caminho das harmônicas se torna menor, atuando menos no circuito.

Uma outra decisão para o filtro passivo, é a faixa de frequência em que o filtro está sincronizado, ou seja, as frequências que ele permitirá passa por ele (MARTINHO, 2012).

Geralmente o filtro passivo é ajustado para uma ordem de harmônica próxima da harmônica a ser eliminada. Podem ser consideradas diversas ligações de filtros em paralelo, quando deseja-se uma forte redução da taxa de distorção em várias ordens. A Figura 16 representa o esquema de ligação de um Filtro passivo.

Figura 16 – Filtro passivo



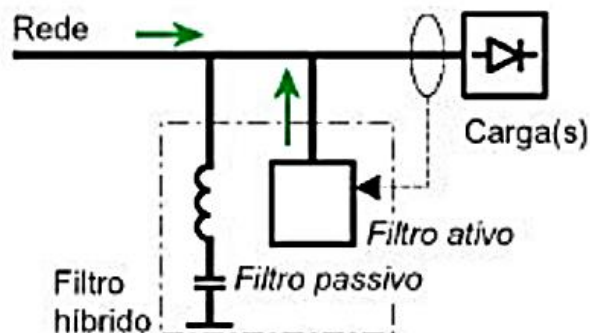
Fonte: (SCHNEIDER, 2003, p. 16).

Conforme Martinho (2012), o filtro passivo, seja para qualquer aplicação, é um sistema inteiramente dependente das características do circuito a que está ligado, sendo assim, depende da corrente, da tensão, da frequência, da impedância da rede. Por essa causa aplicar um filtro passivo exige um estudo aprofundado do sistema de maneira que não sofra alterações ao longo de sua vida útil, possibilitando que suas funções sejam minimizadas, ou eliminadas.

6.3 Filtros híbridos

Os filtros híbridos são compostos por um filtro passivo sintonizado e um filtro ativo. Ou seja, os dois tipos de dispositivos mencionados anteriormente podem ser associados a um mesmo equipamento e constituir um filtro híbrido. É considerada uma nova solução de filtragem, que permite o acúmulo de vantagem das soluções existentes e envolve um amplo controle de potência e de desempenho. A Figura 17 é representada por um filtro híbrido.

Figura 17 – Filtro híbrido



Fonte: (SCHNEIDER, 2003, p. 17).

7 METODOLOGIA

A partir de agora inicia-se os estudos práticos no laboratório do Centro Universitário do Sul de Minas. Tal estudo nos conduzirá a estratégias para resolução ou amenização de harmônicas no circuito.

7.1 Especificações de estudos laboratoriais

Para estudar os fenômenos ocorridos referentes aos distúrbios da qualidade de energia elétrica, durante as três partidas mencionadas anteriormente em motores de indução trifásicos, e comparar esses métodos de partida, será utilizado o laboratório de máquinas elétricas do Centro Universitário do Sul de Minas.

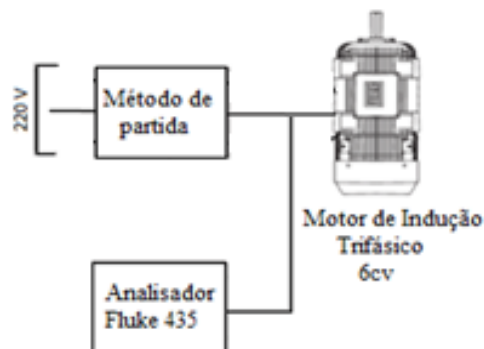
Os materiais a serem utilizados para realizar os experimentos serão os seguintes:

- a) Analisador de qualidade de energia Fluke 435.
- b) Motor de indução trifásico de 6cv.
- c) *soft-starter*.
- d) Inversor de frequência 20 cv.
- e) Chaves contatoras.

Durante a partida de motores elétricos é solicitado da rede de alimentação uma corrente de um elevado valor, como por exemplo de 6 a 10 vezes a corrente nominal. Sob estas condições é necessário a escolha de um bom método para partir um motor elétrico, sem que surja eventos que perturbe o seu funcionamento.

Dando início aos estudos laboratoriais, é realizado primeiramente a partida do MIT com os três métodos de partida. A Figura 18 representa ilustradamente o diagrama da maneira que a instalação de cada partida é realizada.

Figura 18: Diagrama de instalação nas partidas do MIT



Fonte: O autor.

Para realizar as análises pertinentes o MIT é acionado com o método de partida, e entre eles é conectado o analisador de qualidade de energia Fluke 435. O motor de indução é acionado por meio da partida com inversor de frequência, com chave estrela-triângulo e *soft-starter*, com a finalidade de comparar os três casos.

O Quadro 5 indica os parâmetros elétricos do motor de indução trifásico utilizado para o desenvolvimento das análises.

Quadro 5 – Parâmetros elétricos do motor secundário que compõe o barramento

Parâmetros Motor primário	
Potência ativa	6cv
Polos	4 polos
Tensão Y/ Δ	220/380V
Frequência Fundamental	60Hz
Corrente Nominal Y/ Δ	14/8,1A
Velocidade Nominal	3450 rpm
Torque Nominal	11,71 N.m

Fonte: O autor.

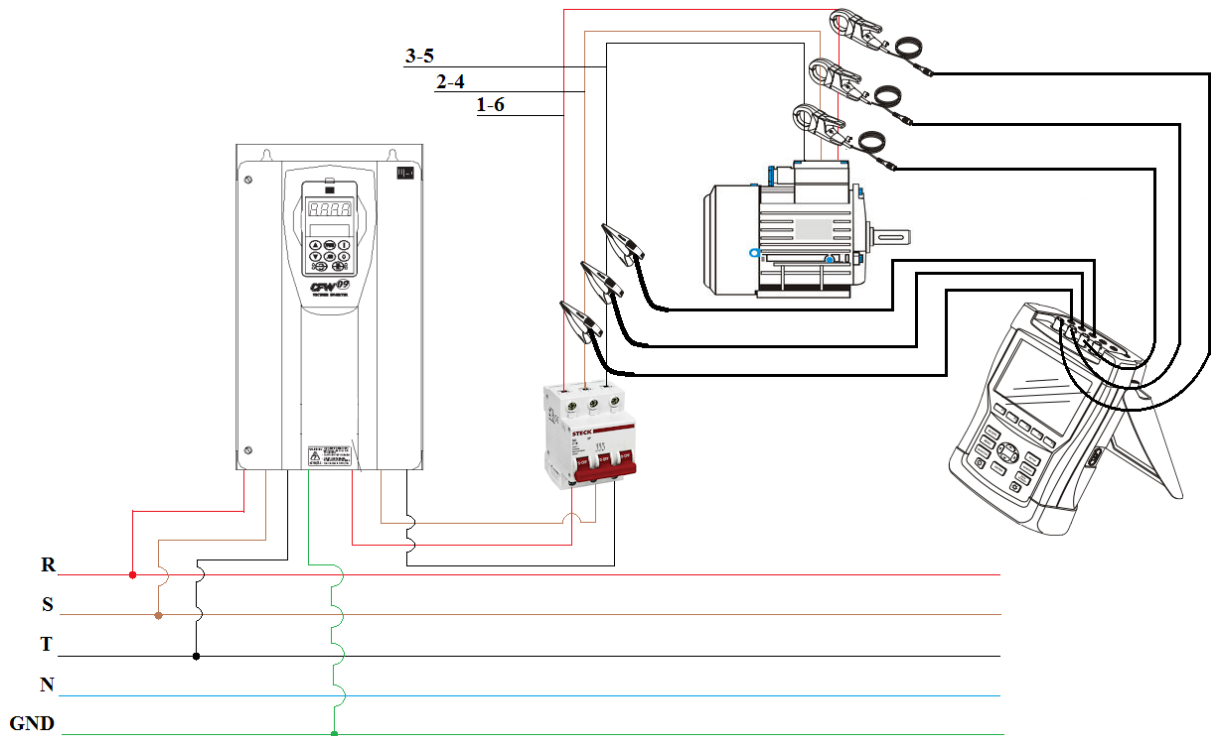
7.2 Resultados das análises laboratoriais

As correntes harmônicas são correntes em frequências múltiplas da frequência fundamental. Quando somamos estas correntes harmônicas com sua frequência fundamental temos como resultado uma distorção harmônica de corrente, e se acontecer dessa distorção harmônica interagir com a impedância da linha, tem-se também como resultado uma distorção harmônica de tensão.

7.2.1 Partida com inversor de frequência

Primeiramente os estudos práticos são realizados em laboratório para analisar distorções harmônicas na partida com inversor de frequência. O circuito da Figura 19, representa o acionamento do MIT.

Figura 19 – Diagrama de ligação do método de partida com inversor de frequência



Fonte: O autor.

Acionou-se o motor de 6 cv por meio de um inversor de frequência de 20 cv, modelo cfw09 do fabricante WEG. O motor é acelerado até a sua velocidade nominal de 3450 rpm. Para essa velocidade nominal de rotação é coletado os espectros harmônicos de tensão de cada fase A Figura 20 representa o resumo da medição em que o motor estava sendo analisado pelo Fluke 435.

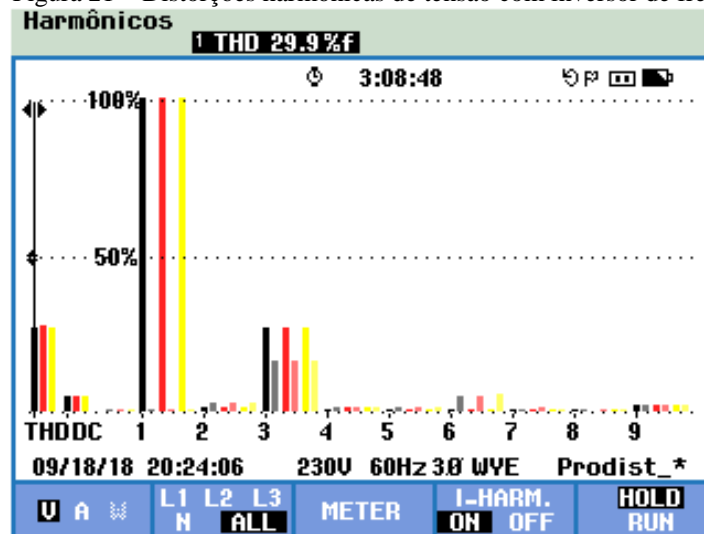
Figura 20 – Resumo da medição com partida utilizando inversor de frequência.

Resumo da medição	
Topologia de medição	Modo 3Ø em estrela
Modo de aplicação	Harmônicas
Primeiro registro	18/09/2018 17:15:32 889msec
Último registro	18/09/2018 20:24:02 889msec
Intervalo de registro	0h 0m 15s 0msec
Tensão Nominal	230 V
Corrente Nominal	N/D
Frequência Nominal	N/D

Fonte: O autor.

Ao realizar as análises com esse método pôde ser constatado que há níveis significativos de harmônicas de tensão e corrente de 3ª e 5ª ordem. A Figura 21 apresenta o espectro da THD de tensão no método de partida.

Figura 21 – Distorções harmônicas de tensão com inversor de frequência



Fonte – O autor.

Observa-se que as harmônicas de ordem 3 possuem o nível de distorção individual de tensão de 96,22% na fase L1, 100,97% na fase L2 e 96,39% na fase L3. Nota-se que os espectros da harmônica de ordem 5 possui na partida do MIT níveis individuais de 5,14% na fase L1, 4,91% em L2 e 5,33% na fase L3. Ao realizar a análise no momento da partida do MIT, pôde ser notado um percentual de harmônicas totais de 276,3% na fase L1, 286,16% em L2 e 285,88% em L3. Em regime permanente, o circuito apresentou em suas fases, uma THD de tensão de 29,9%. A Tabela 2, expõe os valores encontrados das distorções harmônicas de tensão e corrente apresentadas na partida e em regime permanente.

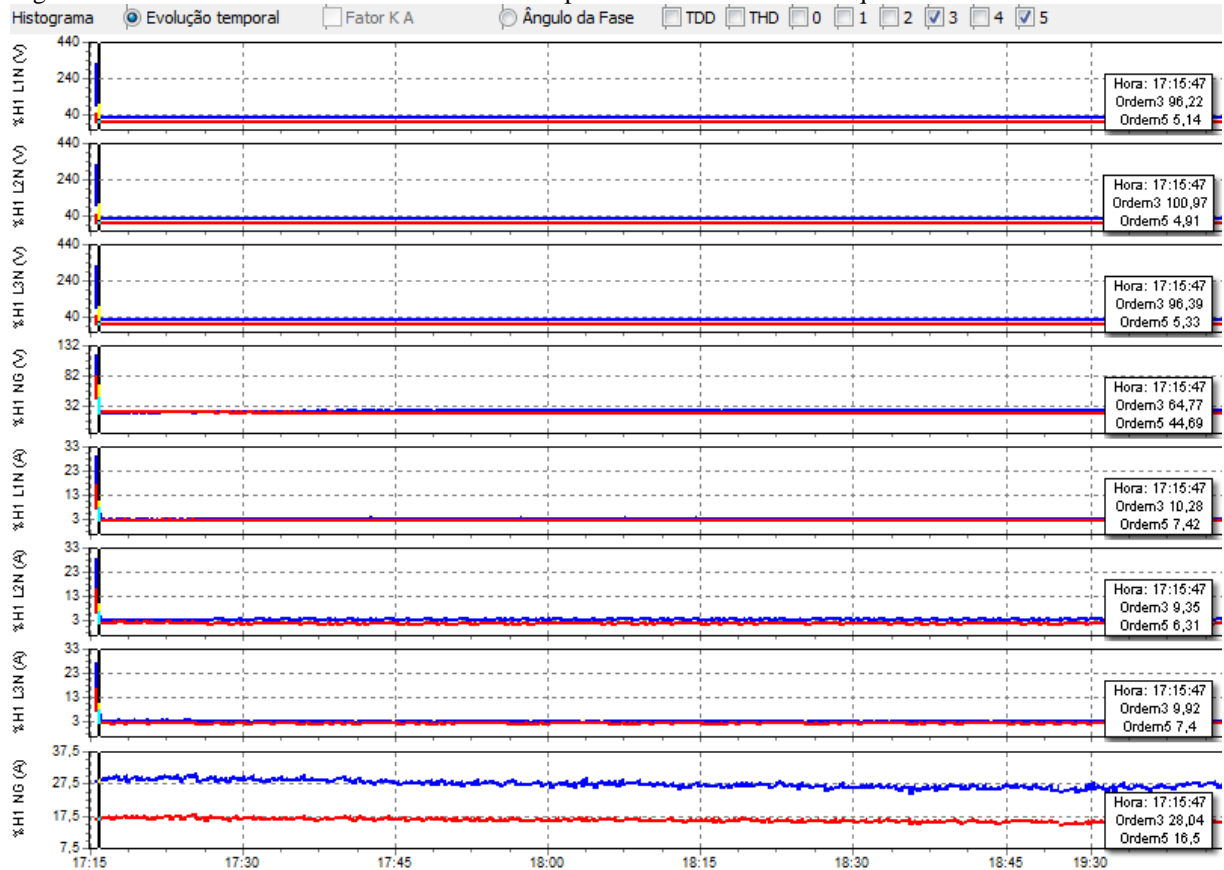
Tabela 2 – TDH e harmônicas individuais na partida com Inversor de Frequência

Partida com Inversor de Frequência				
Fases	Ordem	THD de tensão (%) na partida	Distorção individual V na partida (%)	Distorção individual I na partida (%)
L1	3	276,3	96,22	10,28
	5		5,14	7,42
L2	3	286,16	100,97	9,35
	5		4,91	6,31
L3	3	285,88	96,39	9,92
	5		5,33	7,4

Fonte: O autor.

A Figura 22 retrata, em sua forma de onda, o que foi declarado na Tabela 2.

Figura 22 – Influência das harmônicas coletadas na partida com inversor de frequência



Fonte: O autor.

A Figura 22 mostra as formas de onda de tensão e corrente e o que as distorções harmônicas causaram em suas senoides. Pode-se notar que as ondas apresentam uma aparência de onda totalmente diferente de uma senoide natural, o que retrata em percentuais elevados de distorções harmônicas.

A Tabela 3 e Tabela 4 descrevem, de acordo com o módulo 8 da Prodist, os níveis aceitáveis de distorções harmônicas totais e individuais de tensão nos circuitos.

Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_N \leq 8,13\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_N < 230\text{kV}$	3

Fonte: (ANEEL, 2018, p. 20).

Tabela 4 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$V_n \leq 1\text{kV}$		$1\text{ kV} < V_n \leq 13,8\text{ kV}$	$13,8\text{ kV} < V_n \leq 69\text{ kV}$	$69\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: (ANEEL, 2018, p. 21).

De acordo com a Tabela 3 e Tabela 4, verifica-se que os valores encontrados de THD de tensão do motor está fora do proposto pela Prodist. Ou seja, em regime permanente o sistema possui harmônicas totais de tensão de 29,9%, sendo que o aceitável pela Prodist para a tensão nominal de até 1kV são níveis de harmônicas de até 10%. Observando a 3ª componente harmônica, percebe-se que a mesma está fora do proposto pela Prodist, pois apresenta elevados níveis individuais e totais de distorções. Já a 5ª harmônica está dentro do aceitável pela norma, uma vez que para a componente de ordem 5 o aceitável seria distorções individuais de até 7,5%.

Motores em junção com inversor são vistos pela fonte como uma carga não linear, que insere na corrente da rede um nível elevado de harmônicas, que por sua vez chega a THD superiores ao aceitável pelas normas regulamentadoras. No inversor de frequência contém um retificador em seu interior, que de um aspecto geral, produz harmônicas características na rede. No *hardware* de um inversor existe um filtro, criado para regular a tensão retificada, que conecta a ponte retificadora com outra ponte de transistores IGBT que realizam a inversão da tensão com frequências variáveis. E por esse motivo partir o motor com esse dispositivo

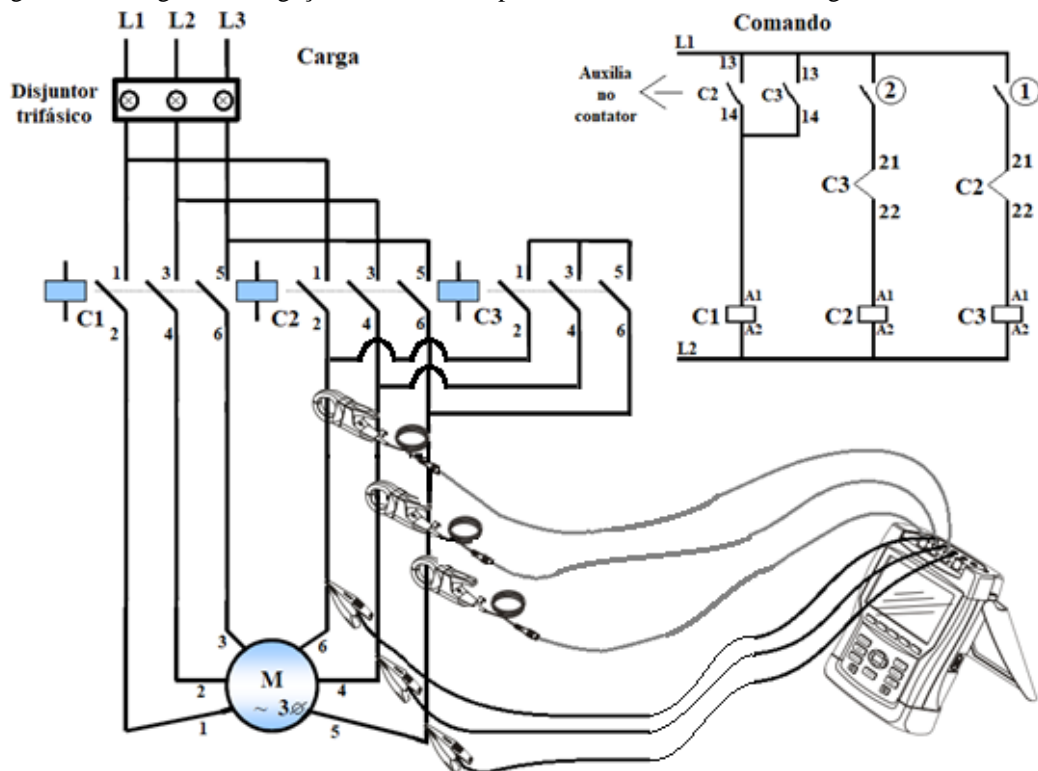
contribuirá consideravelmente na amplitude das harmônicas de 300Hz, 420Hz, 660Hz e 780Hz. Para comprovar essa informação é só observar os níveis totais de harmônicas coletados, a harmônica que mais se destacou é exatamente uma das frequências citadas anteriormente.

O motor de indução trifásico pode também ser uma carga não linear, que contribui para a introdução de harmônicas no sistema. Em vista disso, o MIT possui como aspecto gerar magnitudes na frequência de 180Hz.

7.2.2 Partida com chave estrela-triângulo

Ao iniciar as análises, o motor é acionado com o auxílio da chave estrela-triângulo. O processo foi o mesmo da partida com inversor de frequência. Contudo, os resultados foram muito diferentes. O diagrama da Figura 23 pode representar a ligação do circuito com partida estrela triângulo.

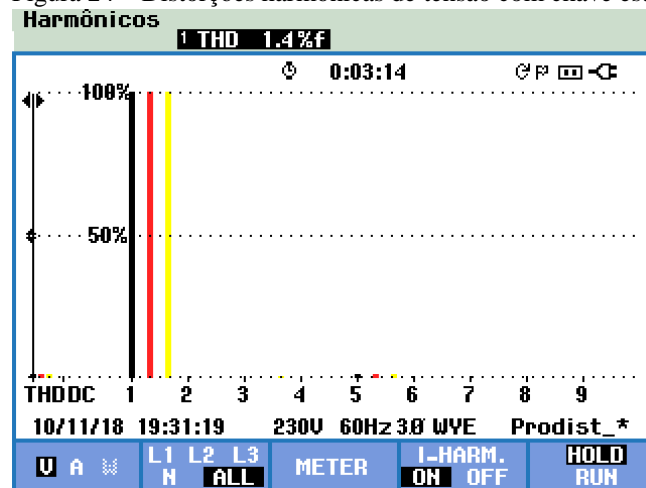
Figura 23 – Diagrama de ligação do método de partida com chave estrela-triângulo



Fonte: O autor.

No ensaio do método de partida estrela-triângulo é apresentado, no momento da partida, uma THD de tensão de 327,67%, quando o circuito foi acionado em estrela. Assim que o circuito comuta de estrela para triângulo, essas harmônicas totais são diminuídas para 1,4% e isso pode ser representado na Figura 24.

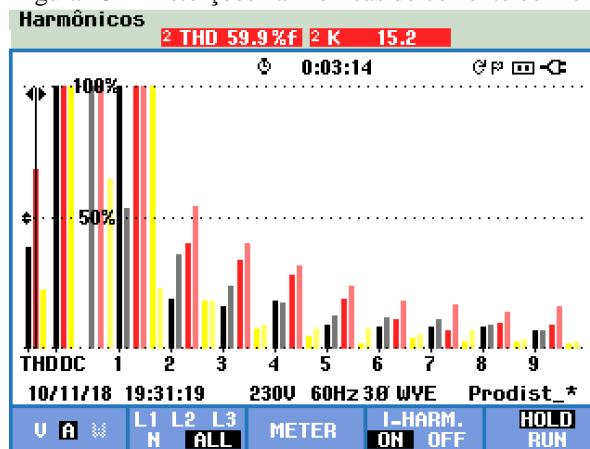
Figura 24 – Distorções harmônicas de tensão com chave estrela-triângulo



Fonte: O autor.

Vale ressaltar que a comutação de estrela para triângulo é realizada em 5 segundos. Já as distorções harmônicas de corrente apresenta, no instante da partida, um nível total de 59,9% em sua frequência, podendo ser demonstradas no gráfico da Figura 25.

Figura 25 – Distorções harmônicas de corrente com chave estrela-triângulo



Fonte: O autor.

As harmônicas de ordem 3 possuem o nível de distorção individual de tensão de 327,67% na fase L1, L2 e L3. Nota-se que os espectros da harmônica de ordem 5 possui na partida do MIT níveis individuais de 77,88% na fase L1, 77,12% em L2 e 87,02% na fase L3. Ao realizar a análise no momento da partida do MIT, pôde ser notado um percentual de harmônicas totais de 327,67% em suas fases. Em regime permanente, o circuito apresentou em suas fases, uma THD de tensão de 1,4%. Ou seja, as distorções harmônicas diminuíram para 1,4% assim que o circuito comutou para triângulo. A Tabela 5, expõe os valores encontrados das distorções harmônicas de tensão e corrente apresentadas na partida.

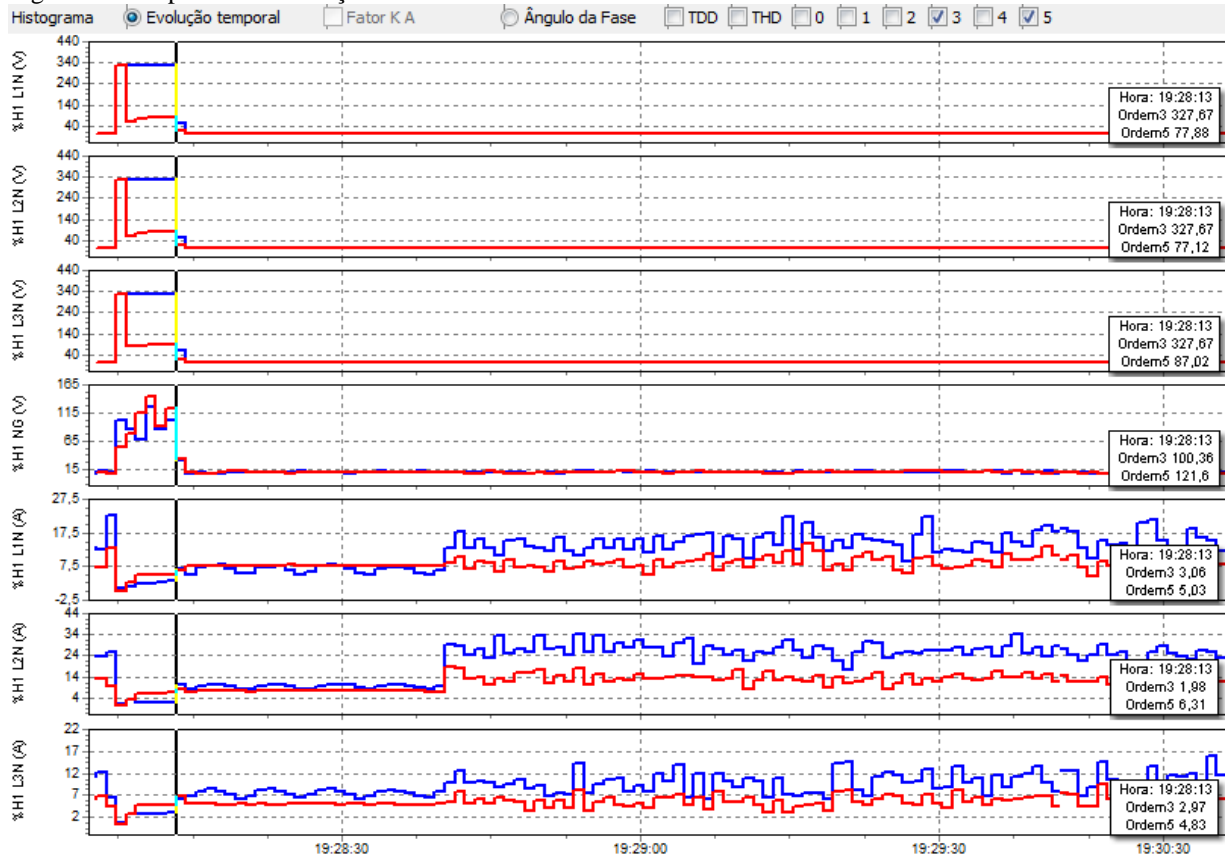
Tabela 5 – TDH e harmônicas individuais na partida com chave estrela-triângulo

Partida com chave estrela-triângulo				
Fases	Ordem	THD de tensão (%) na partida	Distorção individual V na partida (%)	Distorção individual I na partida (%)
L1	3	327,67%	327,67	3,06
	5		77,88	5,03
L2	3	327,67%	327,67	1,98
	5		77,12	6,31
L3	3	327,67%	327,67	2,97
	5		87,02	4,83

Fonte: O autor.

A Figura 26 comprova os dados proporcionados pela Tabela 5. Os valores encontrados em regime permanente estão dentro do aceitável pela norma. Isso pode ser notado ao analisar os dados coletados e ao compará-los com os níveis exigidos pela norma nas Tabelas 3 e 4.

Figura 26 – Impacto das distorções harmônicas individuais de corrente e tensão nas senoides das fases



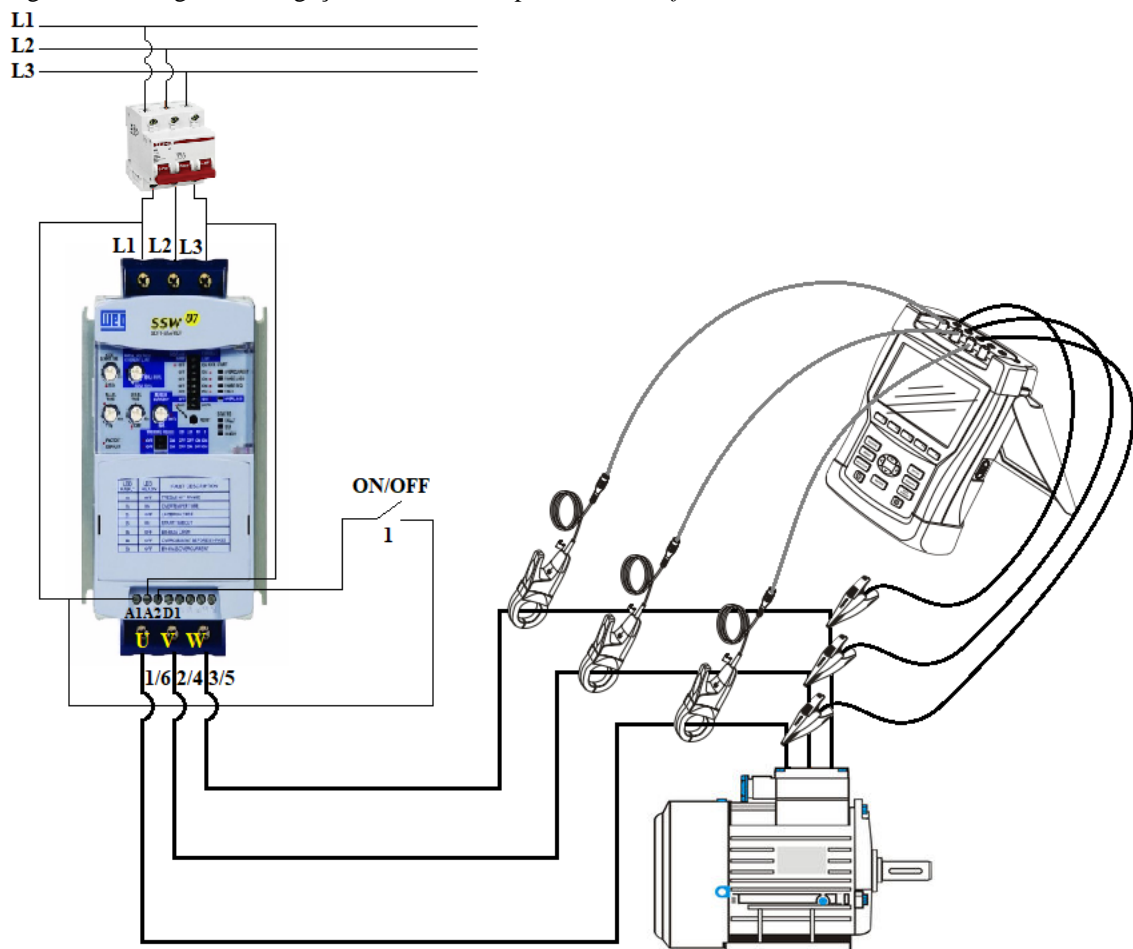
Fonte: O autor.

As harmônicas retratadas são capturadas no momento da partida, mas em compensação esses níveis de distorção diminuiram significativamente após o circuito ser mantido em regime permanente.

7.2.3 Partida com *Soft- Starter*

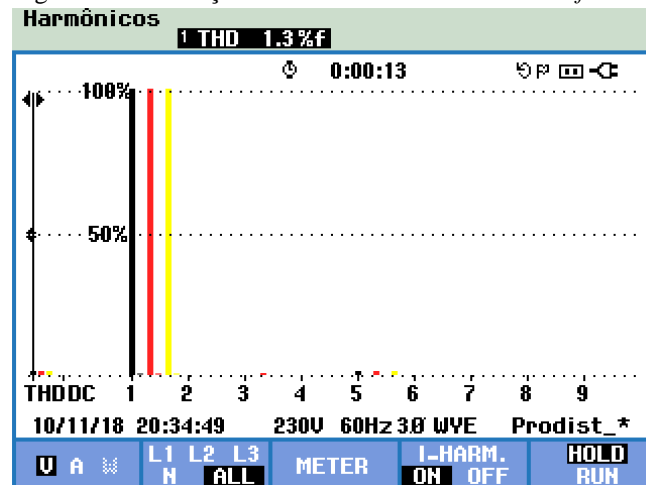
O *soft-starter* foi utilizado nos experimentos para facilitar na comparação com os métodos anteriores. De acordo com os estudos realizados nesse método, o motor de indução é ligado por meio de um *soft-starter*. A Figura 27 representa a maneira que as ligações são realizadas neste método.

Figura 27 – Diagrama de ligação do método de partida com *Soft-Starter*



Fonte: O autor.

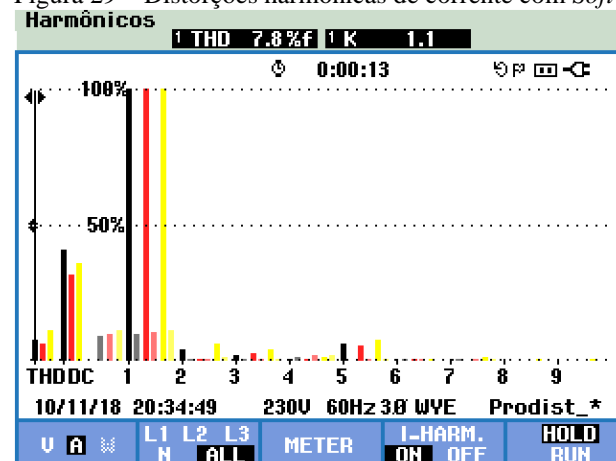
O motor foi acionado por meio de um *soft-starter* do fabricante WEG, modelo SSW07. Em seguida ao realizar as ligações, é detectado no momento da partida níveis de harmônicas de tensão de 57,92% em suas fases. E em regime permanente obteve-se harmônicas totais de 1,3% em suas fases. A Figura 28 mostra graficamente os níveis de distorções em regime permanente com *soft-starter* apurados nas medições.

Figura 28 – Distorções harmônicas de tensão com *Soft- Starter*

Fonte: O autor.

Observando a 3ª harmônica do sistema, é detectado harmônicas individuais de tensão de 38,68% na fase L1, 39,19% em L2 e 39,13% em L3. Ainda em sua 3ª componente, observa-se harmônicas de corrente individuais de 1,5% na fase L1, 1,57% em L2 e 1,61% em L3. Ao analisar a 5ª componente harmônica do sistema, nota-se que há distorções individuais de tensão de 31,11% na fase L1, 30,80% em L2 e 31,42% em L3. Nessa mesma componente há distorções individuais de corrente de 11,68% na fase L1, 11,94% em L2 e 12,94% em L3.

A Figura 29 representa graficamente os níveis de distorção harmônica de corrente. Pode-se notar que o nível de distorção harmônica de corrente no sistema foi de 7.8% em regime permanente.

Figura 29 – Distorções harmônicas de corrente com *Soft- Starter*

Fonte: O autor.

Em regime permanente os níveis de distorção harmônica de corrente e tensão são muito baixos e estão dentro do aceitável pela Prodíst, e pode-se dizer que não há níveis de distorção que prejudique a máquina. A Tabela 6 proporciona todos os valores obtidos das análises.

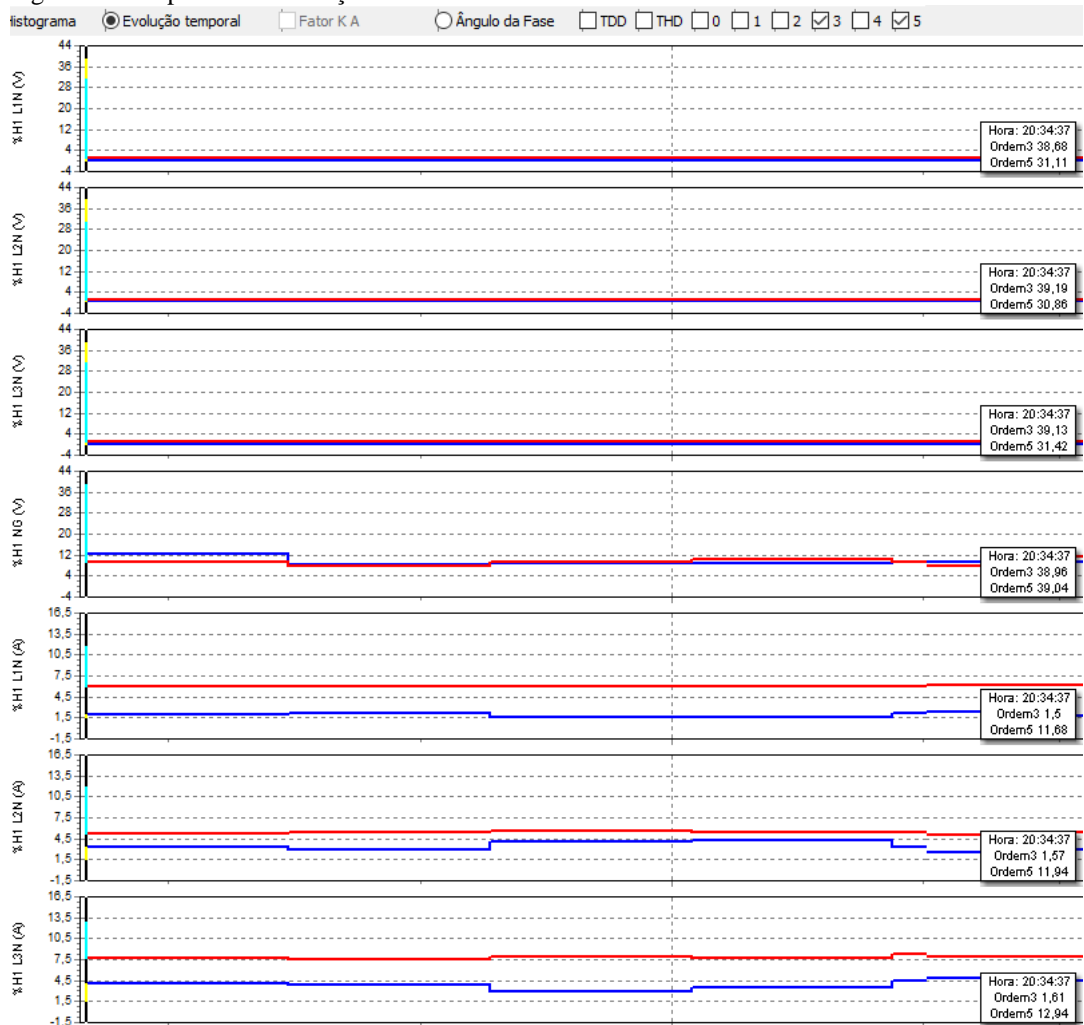
Tabela 6 – Distorções Harmônicas individuais e totais na partida com *Soft- Starter*

Partida com <i>Soft- Starter</i>				
Fases	Ordem	THD de tensão (%) na partida	Distorção individual V na partida (%)	Distorção individual I na partida (%)
L1	3	57,92	38,68	1,5
	5		31,11	11,68
L2	3	58,14%	39,19	1,57
	5		30,80	11,94
L3	3	58,57%	39,13	1,61
	5		31,42	12,94

Fonte: O autor.

Os dados obtidos nessa análise são representados nas ondas de tensão e corrente em cada fase na Figura 30. Comparando os resultados obtidos nesse ensaio com os limites das Tabelas 3 e 4, pode-se dizer que os níveis de distorções harmônicas medidos em regime permanente estão de acordo com o exigido pela Prodist.

Figura 30 – Impacto das distorções harmônicas individuais de corrente e tensão nas senoides das fases



Fonte: O autor.

Vale ressaltar que as análises feitas nas ondas das três fases são realizadas no momento da partida, como nos outros dois métodos executados. Já em regime permanente o acionamento da máquina pelo *soft-starter* apresenta espectros harmônicos tão baixos que pode-se dizer que não há componentes harmônicas que prejudiquem o sistema.

7.3 Viabilidade de custo

Para uma indústria empregar o uso de um método que vá proporcionar benefícios em sua qualidade de energia, é preciso analisar a viabilidade de custo do equipamento que acionará os motores em produção. A Tabela 7 indica o custo de cada equipamento utilizado para partir uma máquina trifásica nos ensaios.

Tabela 7 – Custo estimado para adoção dos métodos de partida

Método de partida	Modelo	Quantidade	Potência do MIT	Custo
Inversor de frequência	CFW09 20 cv - WEG	1	10 cv	R\$6.500,00
<i>Soft-Starter</i>	SSW07 - WEG	1	10 cv	R\$1.583,00
Chave Estrela-Triângulo	WEG	1	10 cv	R\$1.169,00

Fonte: (GRUPO WEG, 2018).

É notável que o uso de um *soft-starter* é interessante para motores de potência acima de 10 cv, pois possui um custo inferior ao do inversor de frequência. Mas, recomenda-se a utilização de um *soft-starter* para potências de no mínimo 400 cv. A adoção de um inversor de frequência, se justifica para motores que possuam potências também elevadas, mas seu custo é bem mais alto ao comparar com o custo de um *soft-starter*. Justificando a aplicação do método estrela triângulo, é um tipo de acionamento não muito utilizado por ser aplicável somente em motores de até 10 cv.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho expõe resultados abrangendo três tipos de acionamentos para acionar um motor de indução trifásico, nas quais utilizou-se partida através de inversor de frequência, chave estrela-triângulo e via *soft-starter*. A rede elétrica ao qual o motor foi acionado não apresentou níveis de distorção que prejudicassem o sistema.

Nas formas de onda de tensão e corrente o esquema de ligação inversor mais motor origina componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem. No momento da partida com inversor de frequência é apresentado um nível de THD de tensão de 280% e em regime permanente esse nível de distorção se reduz para 30%. Na partida com chave estrela triângulo há um nível de THD de tensão de 327,67%, logo em regime permanente esse alto nível de distorção harmônica se reduz para 1,4%. E por fim a partida com *soft-starter* possui um nível de THD de tensão de 58,57% e em regime permanente esse valor se reduz para 1,3%.

De acordo com os resultados obtidos nas análises não foi possível capturar harmônicas em regime permanente nos métodos estrela-triângulo e *soft-starter*, e no método com inversor de frequência é apresentado um nível de distorção que pode ser prejudicial à máquina. *Soft-Starters* e inversores de frequência jogam pequenas quantidades de tensão para que o motor comece com pequenos movimentos até vencer sua inércia e chegar em sua velocidade nominal. Uma vez que a máquina adquire sua velocidade nominal as harmônicas que foram geradas na partida sofrem uma queda, alcançando um valor extremamente baixo e dentro do aceitável pela norma.

No método estrela-triângulo, ao comutar o sistema para triângulo, as harmônicas que faziam-se presentes em estrela caíram bruscamente, isso acontece devido ao motor já ter vencido sua inércia. O método estrela-triângulo atende as necessidades de motores de até 10 cv. Se um motor de 20 cv é acionado por uma chave estrela-triângulo sua corrente de partida é considerada prejudicial ao sistema do motor. Em vista disso, para motores acima de 15 cv, concessionárias de energia não permitem que máquinas sejam acionadas por uma chave estrela-triângulo no âmbito industrial.

A utilização de inversores de frequência em acionamentos de motores elétricos exigem cuidados especiais. O inversor causa harmônicas maiores, mas uma das vantagens dele é conseguir partir qualquer motor independente de sua potência, como por exemplo, motores com o porte de 400 cv. Essas harmônicas causadas na partida com inversor de frequência aparecem devido a adoção do equipamento ao circuito.

Analisando o assunto da pesquisa em um âmbito industrial que possua uma quantidade elevada de motores de grande porte, a melhor opção para acionar as máquinas ali presentes é utilizar o método com inversor de frequência ou *soft-starter*. Se a indústria optar por partir os motores com inversores, será obrigado a utilizar grande quantidade de inversores. Neste caso, a indústria deve ter meios para o gerenciamento de sua qualidade de energia, pois as harmônicas se somarão, podendo ultrapassar os valores definidos em norma.

O método com inversor de frequência se torna descartável para as análises deste trabalho, pois em regime permanente apresentou níveis de distorções harmônicas acima do aceitável pela norma, causando o sobreaquecimento do MIT. Essa consideração é feita devido ao fato dos testes serem realizados em um motor de potência pequena, que não justifica o uso de um inversor de frequência.

A aplicação de um *soft-starter* para o acionamento de um MIT se torna necessária quando a máquina possui a capacidade de no mínimo 400 cv. É considerado um bom método, mas que possui um custo elevado, isso o torna inviável para o caso deste trabalho, já que nos ensaios laboratoriais foi utilizado somente 1 máquina trifásica. Ou seja, o *soft-starter* na maioria dos casos pode ser adotado para controle quando há vários motores operando ao mesmo tempo.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o melhor método a ser utilizado ao acionar a máquina trifásica de 6 cv é o acionamento por chave estrela-triângulo. Pois é um método que atende às necessidades do sistema e com uma boa viabilidade de custo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica. Brasília, DF: 2018. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- ANNUNCIACÃO, Luiz de. **Estudo do impacto do sistema de acionamento de um motor de indução trifásico na eficiência energética e na qualidade da energia elétrica: Um estudo de caso – elevador de canecas**. Cuiabá, 2011. 124 f. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT). Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/282809875_Estudo_do_impacto_do_sistema_de_acionamento_de_um_motor_de_inducao_trifasico_na_eficiencia_energetica_e_qualidade_da_energia_eletrica_Um_estudo_de_caso_-_Elevador_de_canecas>. Acesso em: 22 out. 2017.
- ARRUDA, Elcio Franklin. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada de wavelet**. São Carlos, 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP). Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-25102007-090916/pt-br.php>>. Acesso em: 2 abr. 2018.
- CHAMPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Motores de Indução. Cap. 6, p. 307-394. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.
- GRUPO WEG. Unidade Automação. **Automação e controle industrial: Dispositivos para controle de motores**. Jaraguá do Sul - SC - Brasil: [s.n.], 2016. 17 p. Disponível em: < https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Mini-e-Micro-Drives/c/BR_WDC_IA_DRV_IVT_COMPACT?h=da627f54>. Acesso em: 23 out. 2018.
- ISONI, Marcos. **A moderna Eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas: distorções harmônicas – uma revisão de conceitos gerais**, 2005. Disponível em: < http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf>. Acesso em 17 abr. 2018.
- KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Máquinas de Indução Polifásicas (Assíncronas). Cap. 9, p. 294-345. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.
- MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 137 f. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- NASCIMENTO, Adilson. **Comandos Elétricos**. Apostila, Cap. 1. 45 f. Valinhos, 2015. Disponível em: < <http://www.seaan.com.br/cursos/comandos-eletricos-basico/apostila/>>. Acesso em: 02 set. 2017.
- NERY, Allan; HOPNER, Felipe Sourient. **Análise de Distorções Harmônicas em Planta Industrial Modelada por Fontes de Corrente**. Curitiba, 2016. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Publicação

Disponível em: < https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2015_2_03/2015_2_03_final.pdf >. Acesso em: 15 fev. 2018.

NEVES, Ana Bárbara Fernandes. **Análise dos efeitos do desequilíbrio e da distorção harmônica de tensão no conjugado e no rendimento de um motor de indução trifásico**. Distrito Federal, 2014. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília (UnB). Publicação PPGEE.DM – 579/2014. Disponível em: < <http://repositorio.unb.br/handle/10482/17461> >. Acesso em: 25 out. 2017.

OLIVEIRA, Stanley César de. **Influência de Harmônicos no Fator de Potência**. Itatiba, 2011. 67 f. Dissertação (Graduação) – Universidade de São Francisco (USF). Disponível em: < <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2092.pdf> >. Acesso em: 4 abr. 2018.

OLIVEIRA, Wesley Rodrigues de Oliveira. **Uma análise sobre Inversores de Frequência e Distorções Harmônicas e Inter-Harmônicas**. Brasília, 2013. 83 f. Dissertação (Graduação) – Universidade de Brasília (UnB). Publicação FT.TG-nº02/2013. Disponível em: < http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://bdm.unb.br/bitstream/10483/8247/1/2013_WesleyRodriguesdeOliveira.pdf >. Acesso em: 10 abr. 2018.

PAULILO, Gilson. **Conceitos gerais sobre qualidade de energia**. Cap. 1. 7 f. São Paulo: Revista O Setor Elétrico, 2013. Disponível em: < http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf >. Acesso em: 10 abr. 2018.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira; SAMESIMA, Milton Itsuo. **Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução Trifásico**. Uberlândia, 2007. 30 f. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Disponível em: < <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857> >. Acesso em: 01 nov. 2017.

RIBEIRO, Cristiano Felipe. **Influência dos Harmônicos na Qualidade da Energia Elétrica**. Ouro Preto, 2007. 56 f. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Disponível em: < <http://em.ufop.br/cecau/monografias/2007/CRISTIANO%20FELIPE.pdf> >. Acesso em: 26 out. 2017.

SANTOS, Rafael Simões dos. **Distúrbios nas Partidas de Motores de Indução Trifásicos**. Viçosa, 2011. 55 f. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal de Viçosa (UFV). Disponível em: < https://www3.dti.ufv.br/sig_del/consultar/download/79 >. Acesso em: 19 out. 2017.

SCHNEIDER, Electric. **Qualidade de Energia: Harmônicas**. São Paulo: Apostila Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Edição março, 2003. Disponível em: < <https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf> >. Acesso em: 20 mar. 2018.

SILVA, Marco Aurélio Santos da. **Eletricidade: Acionamento de Motores Elétricos**, 2018. Disponível em: < <http://brasilescola.uol.com.br/fisica/eletricidade-acionamento-motores-eletricos.htm> >. Acesso em: 25 out. 2017.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das distorções harmônicas**: estudo de caso de um sistema industrial. Belo Horizonte, 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Disponível em: <
<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/308M.PDF>>. Acesso em: 21 abr. 2018.